

Maria Komu

## **Painekalibrointijärjestelmä avaruusinstrumenttien testauslaboratorioon**

### **Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 12.2.2013.

**Työn valvoja:**

Prof. Martti Hallikainen

**Työn ohjaaja:**

DI Maria Genzer



**Aalto-yliopisto**  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

Tekijä: Maria Komu		
Työn nimi: Painekalibrointijärjestelmä avaruusinstrumenttien testauslaboratorioon		
Päivämäärä: 12.2.2013	Kieli: Suomi	Sivumäärä:8+89
Radiotieteen ja -tekniikan laitos		
Professuuri: Avaruustekniikka		Koodi: S-92
Valvoja: Prof. Martti Hallikainen		
Ohjaaja: DI Maria Genzer		
<p>Ilmatieteen laitos on rakentanut ja toimittanut paineenmittausinstrumentteja useisiin planeettaluotaimiin ja instrumenttien kehitys jatkuu edelleen. Näiden instrumenttien testausta ja kalibrointia varten IL:n avaruuslaboratoriossa on oma painekalibrointijärjestelmä. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko paineensäätöjärjestelmä mahdollista korvata kaupallisella ratkaisulla. Tässä työssä määriteltiin vaatimukset paineensäätimelle, tutustuttiin kaupallisten paineensäätimien tarjontaan ja hankittiin kaksi paineensäädintä testattavaksi IL:n avaruuslaboratorioon. Paineensäätimille suoritettiin suuri määrä käyttötestejä, joilla haluttiin varmistaa säätimen toiminta kaikissa olosuhteissa, joita paineinstrumenttien testien aikana tullaan tarvitsemaan. Paineensäätimet myös yhdistettiin etäyhteydellä tietokoneeseen ja niillä suoritettiin automaattisesti paineensäätöohjelmia, jotka jäljittelivät paineinstrumenttien testejä. Toinen paineensäätimistä täytti lopulta kaikki asetetut vaatimukset ja tämän työn lopputuloksena ehdotettiin tämän säätimen hankintaa Ilmatieteen laitoksen avaruuslaboratorioon.</p>		
Avainsanat: Avaruustekniikka, paineensäätö, paineen mittaust, painekalibrointi		

Author: Maria Komu		
Title: Pressure Calibration System for Space Instruments' Testing Laboratory		
Date: 12.2.2013	Language: Finnish	Number of pages:8+89
Department of Radio Science and Technology		
Professorship: Space Technology		Code: S-92
Supervisor: Prof. Martti Hallikainen		
Instructor: M.Sc. (Tech.) Maria Genzer		
<p>Finnish Meteorological Institute has built and delivered pressure measurement instruments for many planetary landers and the development of these instruments is still ongoing. Calibration and testing of the instruments is done in-house in FMI's space instrument calibration laboratory with dedicated pressure calibration equipment. The goal of this master's thesis was to find out if the pressure controller of the calibration laboratory can be replaced with a commercial solution. The work began by defining the requirements for the new pressure controller and finding out available commercial controllers. Two controllers were then selected and acquired for testing in FMI's laboratory. During the tests the operation of both controllers was checked in pressure conditions which will be used in future tests of pressure instruments. Pressure controllers were also connected to a computer and automated control programs were run remotely. Final result of this thesis was that one of the controllers passed all the tests and was recommended for the calibration laboratory.</p>		
Keywords: Space technology, pressure control, pressure measurement, pressure calibration		

## Esipuhe

Tämä diplomityö syntyi työskennellessäni Ilmatieteen laitoksella. Mahdollisuudesta tämän työn toteuttamiseen haluan kiittää valvojaani prof. Martti Hallikaista, Uudet havaintomenetelmät -yksikön päällikköä Minna Palmrothia ja Tutka- ja avaruusteknologian ryhmäpäällikköä Ari-Matti Harria. Erityiset kiitokset ohjaajalleni Maria Genzerille tuesta ja kannustuksesta.

Lisäksi haluan kiittää avusta ja hyvistä neuvoista Henrik Kahanpäättä, Jouni Polkkoa, Jouni Rynöä ja Hannu Sinivirtaa.

Kiitokset myös Mittatekniikan keskuksen erikoistutkija Sari Saxholmille tutustumiskäynnin järjestämisestä, sekä Beamexin myyntipäällikkö Jarmo Hyväriselle ja kouluttaja Jari Kiilille hyvästä yhteistyöstä.

Kaikkia työkavereitani haluan kiittää työpäivieni piristämisestä. Suuret kiitokset myös avomiehelleni Henrik Hiedalle tuesta ja ymmärryksestä.

Helsinki, 12.2.2013

Maria Komu

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>ii</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>iii</b>
<b>Esipuhe</b>	<b>iv</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>v</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>vii</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoreettinen tausta ja laboratorion laitteisto</b>	<b>3</b>
2.1 Ilmatieteen laitoksen paineinstrumentit . . . . .	3
2.1.1 Marsin kaasukehän paineen mittaus . . . . .	3
2.1.2 Paineinstrumenttien testaus . . . . .	4
2.2 Tyhjiötekniikka . . . . .	6
2.2.1 Jäännöskaasu ja kineettinen kaasuteoria . . . . .	6
2.2.2 Tyhjiöalueet . . . . .	8
2.2.3 Paineen mittaus . . . . .	9
2.2.4 Tyhjiöpumput . . . . .	14
2.2.5 Paineensäätö . . . . .	16
2.3 Nykyinen painekalibrointijärjestelmä . . . . .	22
2.3.1 Paineensäätöjärjestelmä . . . . .	23
2.3.2 Ohjelmistot . . . . .	25
2.3.3 Uusi MSens . . . . .	25
2.3.4 Referenssimittarit . . . . .	25
<b>3 Vaatimusten määrittely ja aineiston keräys</b>	<b>27</b>
3.1 Vaatimukset uudelle järjestelmälle . . . . .	27
3.2 Vaihtoehtojen selvitys ja aineiston keräys . . . . .	29
3.3 POC6 . . . . .	30
3.4 PACE 5000/6000 . . . . .	35
3.5 Testien suunnittelu . . . . .	38
3.5.1 Kaasunpoisto . . . . .	39
3.5.2 Tiiviystesti . . . . .	39
3.5.3 Manuaalinen testaus . . . . .	40
3.5.4 Etäkäytön testaus . . . . .	40
3.5.5 Automaattiset mittausohjelmat . . . . .	40
<b>4 Käyttötestit</b>	<b>42</b>
4.1 Beamex POC6 . . . . .	42
4.1.1 Asennus ja käyttöönotto . . . . .	42
4.1.2 Tiiviystesti . . . . .	43
4.1.3 Manuaalinen käyttö . . . . .	45

4.1.4	Etäkäytön testaus . . . . .	49
4.1.5	Automaattiset mittausohjelmat . . . . .	50
4.1.6	Tulokset . . . . .	54
4.2	PACE 5000 . . . . .	56
4.2.1	Asennus ja käyttöönotto . . . . .	56
4.2.2	Tiiviystesti ja stabiilisuus . . . . .	57
4.2.3	Manuaalinen käyttö . . . . .	57
4.2.4	Etäkäytön testaus . . . . .	63
4.2.5	Automaattiset mittausohjelmat . . . . .	63
4.2.6	Tulokset . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>69</b>
5.1	Tulevaisuuden suunnitelmia . . . . .	69
5.2	Vaihtoehtoiset toteutustavat . . . . .	70
	<b>Viitteet</b>	<b>71</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>74</b>
<b>A</b>	<b>Paineensäätimien sarjaporttikomennot</b>	<b>74</b>
<b>B</b>	<b>Mittausohjelmat</b>	<b>76</b>
B.1	POC6-säätimen testeissä käytetyt mittausohjelmat . . . . .	76
B.2	PACE-säätimen testeissä käytetyt mittausohjelmat . . . . .	83

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$A$	Pinta-ala
$d$	Tyhjiökammion keskimääräinen halkaisija
$F$	Voima
$f_{0...6}$	PTB201-referenssipainemittarin kalibraatiokertoimet
$k$	Boltzmannin vakio, $1,3806 \cdot 10^{-23}$ J/K
$n$	Ainemäärä. Yksikkö mooli (mol).
$P$	Paine
$P_{cal}$	PTB201-referenssipainemittarin kalibroitu painelukema
$P_{raw}$	PTB201-referenssipainemittarin raakalukema
$P_{cor}$	PTB201-referenssipainemittarin paineen korjaus
$P_0$	PTB201-referenssipainemittarin kalibraation korjaustermi
$R$	Yleinen kaasuvakio, $8,3144$ J/mol·K
$T$	Lämpötila
$T_{ref}$	PTB201- referenssipainemittarin sisäinen lämpötila
$V$	Tilavuus
$\Delta P$	Paineen muutos
$\lambda$	Törmäysväli
$\xi$	Jäännöskaasumolekyylin halkaisija

## Lyhenteet ja termit

Barometri	Painemittari, joka mittaa vallitsevaa ilmanpainetta.
bar	Baari. Paineen yksikkö. $1 \text{ bar} = 1000 \text{ hPa}$ .
DN16KF	ISO-standardissa määriteltä laippa, jota käytetään tyhjiötekniikassa putkien liittämiseen toisiinsa.
FS	Mittausalue ( <i>engl. Full Scale</i> ).
g	Painelukeman yhteydessä tarkoittaa gauge-painetta, eli yli- tai ali-painetta.
HAN-Card	MControl-tietokoneen lisäkortti.
hPa	Hehtopascal. Paineen yksikkö. $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ millibaari}$ .
IL	Ilmatieteen laitos
Manometri	Joillekin painemittarille käytettävä nimitys.
Mars-alue	Paineen vaihteluväli Marsin pinnalla, n. $400...1200 \text{ Pa}$ .
MCap	MControlin käyttämä kontrollipainemittari.
MControl	Kalibraatiolaboratorion ohjaustietokoneessa käytetty ohjelma.
MFC	Terminen massavirtausmittari ( <i>engl. Mass Flow Controller</i> ).
MSens	Kalibraatiolaboratorion mittautietokoneessa käytetty ohjelma.
MIKES	Mittatekniikan keskus

Pa	Pascal. SI-järjestelmän mukainen paineen yksikkö. $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .
PACE	Paineensäädin, valmistaja GE Druck.
POC6	Beamexin valmistama paineensäädin.
PTB201	Vaisala PTB201 Special, mittanormaalina käytetty painemittari.
PTU200	Vaisala PTU200, mittanormaalina käytetty paine-, kosteus- ja lämpötilamittari.
Rdg	Lukema ( <i>engl. Reading</i> ). Käytetään tarkkuuden ilmaisemiseen.
REMS-P	Mars Science Laboratory -laskeutujan paineinstrumentti.
RS-232	Tiedonsiirtostandardi, joka määrittelee miten tietoa siirretään sarjamuotoisesti kahden eri laitteen välillä/tietoliikenneportti.
SCPI	Mittaus- ja testilaitteille kehitetty yleinen standardi, joka määrittelee kommunikaation syntaksin ja komentorakenteen ( <i>engl. Standard Commands for Programmable Instruments</i> ).
Suurtyhjiö	Tyhjiöalue, jossa paine on $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ hPa}$ .
Tcl	Tulkattava ohjelmointikieli ( <i>engl. Tool Command Language</i> )
Turbopumppu	Turbomolekylaarinen tyhjiöpumppu.



# 1 Johdanto

Ilmatieteen laitos on rakentanut ja toimittanut paineenmittausinstrumentteja useisiin planeettalaskeutuihin ja instrumenttien kehitys jatkuu edelleen. Näiden instrumenttien kalibrointia varten IL:n avaruuslaboratorioon on rakennettu painekalibrointilaitteisto. Tämän opinnäytetyön aiheena on selvittää, onko laitteistoon kuuluva paineensäädin mahdollista korvata kaupallisella ratkaisulla.

Ilmatieteen laitoksen panos Suomen avaruustoiminnassa on merkittävä. Suomalaista insinööriyttä on ollut mukana yli 40 avaruusaluksessa ja Ilmatieteen laitos on ollut niistä mukana noin joka toisessa. Avaruuslaitteita suunnitellaan ja rakennetaan IL:n Uudet havaintomenetelmät ja Havaintopalvelut -yksiköissä. Tämä opinnäytetyö on tehty Uudet havaintomenetelmät -yksikön Tutka- ja avaruusteknologian ryhmässä. Laitteet liittyvät usein eri taivaankappaleitten kaasukehien tai magneettikenttien tutkimukseen. Etenkin Mars on ollut tärkeä vertailevan planeettatutkimuksen kohde. Marsin ja Maan kaasukehien samankaltaisuus on mahdollistanut sen, että Ilmatieteen laitos on yhdessä Helsingin yliopiston kanssa sovittanut mm. pohjoismaissa käytetyn sääennustemallin toimimaan Marsin kaasukehän tutkimuskäytössä. Tutkimalla Marsia voimme myös oppia jotakin uutta Maapallosta ja sen ilmakehästä, minkä takia tämä on Ilmatieteen laitoksen kannalta merkittävä tutkimuskohde. Myös tämä opinnäytetyö on rajattu koskemaan Marsin olosuhteita ja paineensäätöä Mars-paineessa.

IL:n paine- ja kosteusinstrumenttien havaintojen avulla tutkitaan Marsin kaasukehän käyttäytymistä sekuntien mittakaavasta Marsin vuodenaikojen vaihteluun. Oleellinen osa tarkkojen ja luotettavien painemittausinstrumenttien kehityksessä on IL:n painekalibrointilaitteisto. IL:n avaruuslaboratoriossa pyritään luomaan instrumenttien testausta ja kalibrointia varten samankaltainen ympäristö kuin kohdeplaneetalla. Avaruuslaboratorion laitteistolla pystytään säätämään niin painetta, lämpötilaa kuin kosteutta. Samaan aikaan yhtä tai useampaa instrumenttia mitataan erilaisissa olosuhteissa. Erikoisista olosuhteista johtuen vaatimukset mittaus- ja säätöjärjestelmälle ovat haastavia. Nykyistä, jo yli 20-vuotiaista laitteistoa on alettu vähitellen uusimaan ja tämän opinnäytetyö osaltaan edistää tätä uudistusprojektia.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko IL: painekalibrointijärjestelmän paineensäädin mahdollista korvata kaupallisella ratkaisulla. Toiveena oli löytää kaikki vaatimukset täyttävä paineensäädin, joka pystytään yhdistämään olemassa olevaan painejärjestelmään. Jatkotavoitteena oli uuden paineensäätimen testaus painejärjestelmään kytkettynä, mikäli sopiva säädin löytyy. Paineensäädin olisi mahdollista myös rakentaa itse alusta asti tai käyttää olemassa olevia komponentteja ja uusia vain osa elektroniikasta sekä säätöohjelmisto, mutta sen selvitys jätettiin tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Opinnäytetyön ulkopuolelle jätettiin myös uuden painekalibrointijärjestelmän käyttöönotto, johon kuuluu myös instrumenttien mittausjärjestelmän kehitys ja lämpötilan kontrolloinnin toteutus.

Työ alkoi säätimen vaatimusten määrittelyllä. Vaatimukset perustuivat olemassa olevaan laitteistoon ja paineinstrumenttien testivaatimuksiin. Paineensäätimen etsintä toteutettiin tutustumalla useisiin kaupallisiin paineensäätimiin valmistajien spesifikaatioiden avulla ja olemalla tarvittaessa henkilökohtaisesti yhteydessä valmis-

tajiin. Opinnäytetyön puitteissa vierailtiin myös Mittatekniikan keskuksen painelaboratoriossa tutustumassa heidän laitteistonsa. Sopivia kaupallisia säätimiä löytyi kaksikin kappaletta, joten työ jatkui laitteiden hankinnalla testejä varten. Säätimien liittäminen painejärjestelmään vaati tutustumista painesysteemien liitäntöihin, sekä muutamien osien hankintaa liittämistä varten. Paineensäätimien testit suunniteltiin huolella, jotta voitaisiin varmistua siitä että säädin toimii kaikissa olosuhteissa. Tärkeä osa käyttötestejä oli paineensäätimen ohjaaminen automaattisesti etäyhteyden kautta. Sitä varten opeteltiin kirjoittamaan testiohjelmia Tcl-ohjelmointikielellä.

Luku 2 sisältää taustatietoa sekä teoriaosuuden. Luvussa esitellään ensin lyhyesti Ilmatieteen laitoksen paineinstrumentit ja niiden toimintaperiaate, sekä Marsin paineolosuhteet ja paineinstrumenttien testaus Marsin ympäristöä varten. Sen jälkeen käydään läpi tyhjiötekniikan perusteita ja tyhjiölaitteita soveltuvien osien. Luvun lopussa esitellään IL:n nykyinen painekalibrointilaitteisto.

Luvussa 3 esitellään uudelle paineensäätimelle asetetut vaatimukset. Luku sisältää myös paineensäätimen valinnan ja siihen käytetyn aineiston esittelyn, sekä käyttötestien suunnittelun. Käyttötestit ja testien tulokset on esitetty luvussa 4.

Luvussa 5 on annettu yhteenveto tästä opinnäytetyöstä, sekä suunnitelmia tulevaisuudelle ja pohdintaa muista vaihtoehtoista kaupallisen paineensäätimen hankinnan lisäksi.

## 2 Teoreettinen tausta ja laboratorion laitteisto

### 2.1 Ilmatieteen laitoksen paineinstrumentit

Ilmatieteen laitoksella (IL) on pitkä historia avaruusinstrumenttien rakentamisesta. Paineinstrumentteja IL on toimittanut tähän mennessä kuuteen eri luotaimen. Viisi näistä oli Mars-luotaimia: Mars 96 vuonna 1996, Mars Polar Lander vuonna 1997, Beagle 2 vuonna 2003, Phoenix vuonna 2007 ja Mars Science Laboratory (MSL) vuonna 2011. Näistä Phoenix ja Mars Science Laboratory laskeutuivat onnistuneesti ja IL:n paineinstrumentit toimivat moitteettomasti. MSL:n kulkijan, Curiosityn, mukana olevaa REMS-P -paineenmittausinstrumenttia on käytetty tässä työssä esimerkkinä paineinstrumentin testauksen suhteen. Mars-luotaimien lisäksi Ilmatieteen laitoksen paineinstrumentti on ollut mukana Cassini-satelliitin Huygens-luotaimessa, joka laskeutui Saturnuksen kuuhun Titaniin 2005. [1]

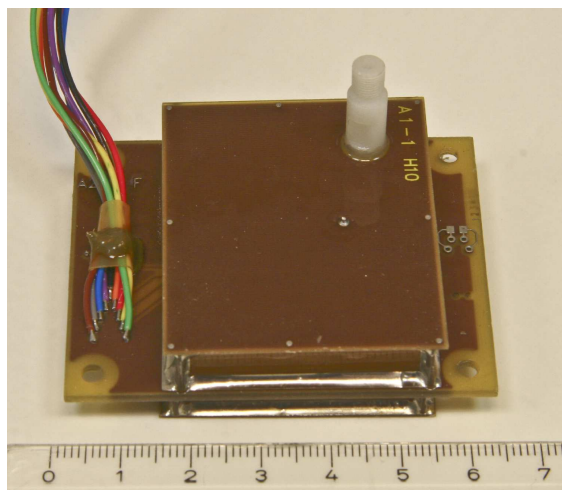
Uusia paineinstrumenttiprojekteja on käynnissä kolme: Mars-laskeutuja MetNet, ESA:n Entry Demonstrator Module -laskeutujan DREAMS (Dust Characterisation, Risk Assessment and Environment Analyser on the Martian Surface) ja NASA:n InSight -laskeutuja (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport). Kaikki ovat Mars-missioita joihin Ilmatieteen laitos toimittaa painemittalaitteen. MetNet- ja DREAMS-lennoille toimitetaan myös kosteudenmittausinstrumentti. Koska kaikki käynnissä olevat instrumenttiprojektit suuntautuvat Marsiin, on tämän opinnäytetyön rajausta Mars-painealueelle perusteltua.

Kaikki IL:n paineinstrumentit perustuvat Vaisala Oyj:n kehittämään anturitekologiaan. Paine mitataan Vaisalan kapasitiivisen Barocap<sup>®</sup>-anturin avulla. Barocap-anturi on mikromekaaninen, piipohjainen anturi, joka mittaa absoluuttista painetta piikalvon mittojen muuttumisen perusteella. Ympäröivän paineen kasvaessa tai pienentyessä kalvo taipuu, jolloin elektrodien välinen etäisyys muuttuu ja tällöin myös anturin kapasitanssi muuttuu. Kapasitanssi mitataan ja muunnetaan painelukemaksi. Barocap-anturin rakenne ja toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5 paineen mittausta käsittelevässä kappaleessa 2.2.3. Vaisalan antureilla on pieni hystereesi, erinomainen tarkkuus ja hyvä pitkänajan stabiilisuus. [2]

Barocap-antureiden kapasitanssi riippuu paineen lisäksi myös lämpötilasta. Lämpötilan mittaamiseen käytetään Vaisalan Thermocap<sup>®</sup>-anturia, jossa on myös kapasitiivinen mittapää. Näiden lisäksi paineinstrumenteissa on vakiokondensaattoreita, joita käytetään kalibraatioreferenssinä, sekä lukuelektroniikka. Lukuelektroniikan tärkeimmät osat ovat kapasitanssi-taajuusmuunnin ja multiplekseri. Instrumentti mittaa kerrallaan yhtä mittapäättä, joka valitaan multiplekserin avulla. Ulostulosignaalin taajuus riippuu mittapään kapasitanssista. Mekaanisesti paineinstrumentit rakentuvat piirilevystä, faradisuojusta, sekä mittausputkesta, jota pitkin laite on yhteydessä mitattavaan kaasuun. Kuvassa 1 on esimerkkinä REMS-P -paineinstrumentti.

#### 2.1.1 Marsin kaasukehän paineen mittaus

IL:n avaruuslaboratorion painekalibrointijärjestelmän tehtävä on jäljitellä Marsin paineolosuhteita. Tästä syystä on oleellista tuntea Marsin kaasukehän ominaisuudet



Kuva 1: REMS-P -paineinstrumentti. Mittauselektronikka sijaitsee faradisuojan sisällä. Mitattava kaasu pääsee faradisuojan sisälle kuvassa oikeassa yläkulmassa sijaitsevan mittausputken kautta. (Kuva: Jouni Polkko)

ja käyttäytyminen.

Mars on uloin maankaltainen planeetta ja läpimitaltaan hieman yli puolet Maasta. Marsin pyörimisakseli on ratatasoon nähden kallellaan noin  $25^\circ$  astetta, lähes saman verran kuin Maalla ( $23,5^\circ$ ). Myös Marsin vuorokauden pituus on myös hyvin lähellä Maan vuorokautta, 24 tuntia 37 minuuttia. Näistä syistä myös Marsissa on vuodenaajat ja kaasukehä käyttäytyy samalla tavoin kuin Maan kaasukehä. Kaasukehien koostumus sen sijaan on erilainen. Marsin kaasukehä koostuu 95-prosenttisesti hiilidioksidista ja ilmanpaine Marsin pinnalla on välillä 2,6...12,4 hPa [3], eli alle sadasosa Maan ilmanpaineesta. Keskilämpötila on alhainen, vain  $-53^\circ\text{C}$ , mutta päiväntasaajalla lämpötila voi kesällä nousta yli  $0^\circ\text{C}$  asteen. Matala lämpötila aiheuttaa käytännön haasteita mittausinstrumenttien suunnittelussa. [4]

Paine Marsin pinnalla vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Kaasukehän hiilidioksidi kondensoituu sille navalle, jossa vallitsee talvi ja sublimoituu toisella navalla. Tämä aiheuttaa navoille paine-eron josta aiheutuu ilmastollinen virtaus kesänavalta kohti talvinapaa. Vuotuinen paineen vaihtelu on suhteessa suuri verrattuna Maahan, noin 20% keskipaineesta. Esimerkiksi Viking 1 -laskeutujan mitaama paineen vaihtelu yhden Marsin vuoden aikana oli 681...900 Pa keskipaineen ollessa 794 Pa. Absoluuttisesti nämä paineenvaihtelut ovat kuitenkin pieniä Maan ilmakehän paineen vaihteluihin verrattuna. Paine vaihtelee myös vuorokauden aikana. Nämä paineenvaihtelut ovat pieniä ja epäsäännöllisiä. Esimerkiksi Phoenixin laskeutumispaikalla  $68^\circ$  pohjoista leveyttä vuorokautinen vaihtelu oli noin 10 Pa [5]. Pölypyörteet aiheuttavat lisäksi nopeita paineen muutoksia sekuntien aikaskaalassa. [6]

### 2.1.2 Paineinstrumenttien testaus

Paineinstrumenteille suoritetaan ennen luovutusta useita testejä erilaisissa ympäristöolosuhteissa toiminnallisuuden ja mittaustulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Uuden painesäätimen on kyettävä säätämään paineolosuhteita siten, että painein-

strumenttien testaus on mahdollista suorittaa vaatimusten mukaisesti. Vaatimukset muodostetaan instrumentin toimintaympäristön ja tehtävän mukaan. Marsiin lähetettyjen paineinstrumenttien testausmenetelmät ovat kehittyneet vuosien saatossa ja tässä työssä käytetään esimerkkinä viimeisimmän valmistetun instrumentin, REMS-P:n, testejä. Alla on lueteltu suoritusjärjestyksessä kaikki REMS-P:n lentomallille IL:llä suoritettut testit ennen instrumentin toimittamista [7]:

1. Toiminnallinen testaus
2. Kalibraatio
3. Paistotesti
4. Tarkastustesti
5. Lämpötyhjiötesti
6. Vanhennus eli lämpösyklus
7. Tarkastustesti
8. Satunnaistärinätesti
9. Kalibraatio
  - Kalibraatio Mars-painealueella
  - Korkean painealueen kalibraatio
  - Satunnaisen tarkistusdatan mittaus
  - Tehonkulutus ja käyttöjännitteen vaikutus
  - Aikavakiotesti
  - Lämpötilagradienttitestit

Kalibraatio- ja tarkastustesteissä instrumenttia mitataan erilaisissa paine- ja lämpötilapisteissä, jotka vastaavat Marsin olosuhteita. Tarkoituksena on kerätä dataa, jonka avulla määritetään instrumentin kalibraatioparametrit, sekä mittausten toistettavuus ja stabiilisuus. Analysoimalla tulokset saadaan instrumentin tarkkuus. Testeissä myös varmistetaan, että laite toimii määritetyllä mittausalueella. Kalibraatiossa testivaatimuksissa määritetyt painepisteet mitataan useassa lämpötilassa, jonka lisäksi tehdään painepyyhkäisy, eli mittaus tasaisesti muuttuvan paineen aikana, kaikissa lämpötiloissa ja suurtyhjiömittaus +25 asteessa. Tarkastustesti on kalibraation kaltainen testi, mutta siinä mitataan pienempi määrä lämpötila- ja painepisteitä. Tarkastustestin tarkoitus on varmistaa laitteen toiminta ympäristötestien välillä. Korkean painealueen kalibraatiossa instrumentti kalibroidaan karkeasti Mars-alueelta vallitsevaan ilmanpaineeseen asti laukaisua edeltäviä aputestejä varten. Aikavakiotestissä on tarkoitus määrittää instrumentin painelukeman vasteaika. Yksi mittaus suoritetaan myös muuttuvassa lämpötilassa, jolloin simuloidaan todellista ympäristöä Marsissa: sekä lämpötila että paine muuttuvat. Uuden paineensäätimen

testien suunnittelussa on käytetty pohjana näitä REMS-P -instrumentin testejä. Testien parametrit ja suoritus käydään läpi kappaleessa 3.5. [7]

Loput luetelluista testeistä suoritetaan joko huoneenpaineessa tai vakiopaineessa, jolloin ne eivät ole oleellisia paineensäädön kannalta. Huoneenpaineessa suoritettavia testejä ovat toiminnallinen testaus, paistotesti, vanhennus ja satunnaistärinätesti. Tehonkulutustestissä ja lämpötilagradienttitestissä paine on 8 hPa koko testin ajan, ja lämpötyhjiötestissä taas vaaditaan pelkästään suurtyhjiö.

## 2.2 Tyhjiötekniikka

Tässä luvussa käydään tiivistä läpi tyhjiötekniikan perusteita, jotka auttavat ymmärtämään, miksi paineensäätö etenkin Mars-painealueella on haastavaa. Kaasun käyttäytymisen hahmottaminen tyhjiöjärjestelmässä on tärkeää koko systeemin ymmärtämisen kannalta. Tyhjiötekniikan teoria alkaakin siten usein jäännöskaasun ominaisuuksista ja kineettisestä kaasuteoriasta.

Fysiikassa ja tekniikassa absoluuttinen tyhjiö tarkoittaa tilavuutta, jossa ei ole ainetta. Käytännössä tyhjiö on tilavuus, josta jäännöskaasut on poistettu niin tarkoin kuin on tarpeellista tai mahdollista. Tyhjiön aikaansaaminen edellyttää ilmatäivistä kammiota, josta kaasut ja höyryt poistetaan tyhjiöpumpulla. Kammiossa on yleensä molempia, myös tarttuneena tyhjiösystemin sisäpintoihin. Kaasujen ja höyryjen poistaminen kammioista on aluksi suhteellisen helppoa, mutta jäännöserän pumppaaminen muuttuu sitä vaikeammaksi, mitä vähemmän sitä on jäljellä. Tätä jäännöserää kutsutaan jäännöskaasuksi. Jäännöskaasu koostuu pääasiassa neutraaleista molekyyleistä. Huoneilmassa molekyyliä nopeudet ovat tyypillisesti satoja metrejä sekunnissa ja jokainen molekyyli törmää toiseen molekyyliin lähes  $10^{10}$  kertaa sekunnissa. Jos systeemin lämpötila ei laske, molekyyliä liike-energia säilyy harvassakin jäännöskaasussa, mutta törmäykset molekyyliä välillä vähenevät jyrkästi ja lopulta häviävät kokonaan. Käytännössä paraskin tyhjiö sisältää aina jonkin verran jäännöskaasua. [8]

### 2.2.1 Jäännöskaasu ja kineettinen kaasuteoria

Pumppauksen alkaessa tyhjiösystemi on yleisimmin täynnä ilmaa. Pumppauksen edetessä jäännöskaasun koostumus muuttuu, sillä koostumukseen alkaa vaikuttaa systeemin seinämistä irtoava kaasu. Tyypillisesti lopputilanteessa 70...90% jäännöskaasusta on vesihöyryä ja tyhjiön pumppauksen edistyessä systeemin sisäpinnoilla on paljon suurempi kaasumäärä kuin sen tilavuudessa. Kaasu- ja höyrymolekyylejä irtoaa pinnoista systeemin tilavuuteen lämpöliikkeen vaikutuksesta, jolloin ne voidaan poistaa tyhjiöpumpulla. Jäännöskaasun määrä systeemissä vähenee kuitenkin vain tiettyyn rajaan asti, sillä käytännössä jokaisella tyhjiösystemillä on taipumus vuotaa. Vuoto voi olla kaasun pääsemistä kammioon systeemin ulkopuolelta, tai näennäistä vuotoa, joka aiheutuu molekyyliä irtoamisesta systeemin sisäpinnoilta tai systeemissä olevista materiaaleista haihtuvia höyryjä. Tyhjiökammioon syntyy tasapaino, kun kaasua vuotaa tilavuuteen yhtä nopeasti kuin pumppu pystyy niitä poistamaan. [8]

Useiden tyhjiölaitteiden toiminta perustuu jäännöskaasun osittaiseen ionisointiin. Positiivinen ioni syntyy kun neutraalista atomista tai molekyylistä irrotetaan yksi tai useampi elektroni. Elektronin sitoutuessa neutraaliin atomiin tai molekyyliin syntyy negatiivinen ioni. Ionit eivät säily jäännöskaasussa, vaan rekombinoituvat takaisin neutraaleiksi atomeiksi ja molekyyleiksi sähköisten vetovoimien seurauksena hyvin nopeasti. Positiiviset ja negatiiviset hiukkaset kyetään kuitenkin erottamaan sähkö- ja magneettikenttien avulla. Tähän perustuvat monet tyhjiötekniikan sovellutukset. [8]

Kineettinen kaasuteoria pyrkii selittämään kaasun makroskooppisia ominaisuuksia. Se perustuu useisiin postulaatteihin, joiden sisältö on seuraava:

- Kaasut koostuvat hyvin pienistä, erillisistä rakenneosasista kuten atomeista ja molekyyleistä, jotka ovat jatkuvassa, suoraviivaisessa liikkeessä. Rakenneosaset ovat niin harvassa, että niiden tilavuus on hyvin pieni verrattuna kaasun kokonaistilavuuteen. Atomit ja molekyylit eivät ole keskenään vuorovaikutuksessa muuten kuin törmätessään.
- Suoraviivainen liike häiriintyy törmäyksissä muihin kaasumolekyyliin tai kammion seinämiin. Nämä törmäykset oletetaan täysin elastisiksi, eli rakenneosasten liikemäärä ja liike-energia eivät muutu.
- Jatkuvasta liikkeestä johtuen jokaisella molekyylillä on tietty määrä liike-energiaa. Koska molekyylien nopeudet voivat olla erisuuria, myös liike-energian määrä vaihtelee. Kineettisen energian kokonaismäärä riippuu lämpötilasta ja atomien ja molekyylien määrästä kammiossa. Rakenneosasten keskimääräinen kineettinen energia on suoraan verrannollinen kaasun lämpötilaan. [9]

Jäännöskaasun tiheys on yleensä niin pieni, että molekyylien tilavuuksista ja keskinäisistä vetovoimista johtuvia korjauksia ei tarvita. Jäännöskaasulle voidaan käyttää siis ideaalikaasun tilanyhtälöä, joka on johdettavissa kineettisen kaasuteorian postulaateista:

$$PV = nRT \quad (1)$$

Yhtälössä  $p$  on systeemin paine,  $V$  on kaasun tilavuus,  $n$  on kaasumoolien määrä,  $R$  on yleinen kaasuvakio  $R = 8,3144 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  ja  $T$  lämpötila. [8]

Ilmanpaineessa suljetussa kammiossa olevan kaasun molekyylit törmäilevät jatkuvasti toisiinsa ja kammion seinämiin. Matkaa, jonka molekyyli kulkee kahden peräkkäisen törmäyksen välillä, kutsutaan törmäysväliksi  $\lambda$ . Törmäysväleistä voidaan laskea keskimääräinen törmäysväli  $\langle \lambda \rangle$ . Se tarkoittaa matkaa jonka molekyyli keskimäärin kulkee ennen seuraavaa törmäystä ja määritellään yhtälöllä:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} P \xi^2} \quad (2)$$

Yhtälössä  $k$  on Boltzmannin vakio  $k = 1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  ja  $\xi$  on jäännöskaasumolekyylin halkaisija. [8]

Keskimääräisen törmäysvälin pituuden ja systeemin seinämien etäisyyden  $d$  välisen suhteen mukaan voidaan määritellä jäännöskaasun kolme eri tilaa: viskoottinen tila,

välitila ja molekyylitila. Huoneenpaineessa kammiossa oleva kaasu on viskoottisessa tilassa. Kun kammiota aletaan pumpata huoneenpaineesta suurtyhjiöön, kaasun tila muuttuu viskoottisesta tilasta välimuodon kautta molekyylitilaan. Vastaavasti kaasuvirtaus muuttuu viskoottisesta virtauksesta välimuotoisen virtauksen kautta molekyylivirtaukseksi. [8]

Viskoottisessa tilassa pätee  $\langle \lambda \rangle < d/100$ . Tällöin kaasumolekyylien tiheys on niin suuri, että molekyylit törmäävät toisiinsa useammin kuin kammion seinämiin. Viskoottisuus ilmenee kaasun sisäisenä kitkana, joka vastustaa virtausta. Molekyylit ovat törmäysten ja keskinäisten vetovoimien vuoksi ikään kuin sidotut toisiinsa. Lämmön johtuminen on tehokasta, sillä törmäyksissä tapahtuu energian ja impulssin vaihtoa molekyylien kesken. Viskoottinen virtaus voi olla pyörteetöntä eli laminaarista tai pyörteistä eli turbulenttia.

Välitila, jossa  $d > \langle \lambda \rangle > d/100$ , on siirtymävaihe viskoottisesta tilasta molekyylitilaan. Jäännöskaasun ominaisuudet muuttuvat vähitellen tilasta toiseen.

Molekyylitilassa  $\langle \lambda \rangle > d$ . Kaasumolekyylien tiheys on niin pieni, että ne törmäilevät toisiinsa paljon harvemmin kuin kammion seinämiin. Suuri osa molekyyleistä on kiinnittyneenä kammion seinämiin. Lämpöliikkeen vaikutuksesta molekyylit voivat irrota seinämistä, kulkea kammion poikki kerran tai useammin ja kiinnittyä uudelleen seinämäänsä. Molekyylien liike on yksilöllistä, toisista molekyyleistä riippumatonta. Lämmön johtuminen on vähäistä ja säteilyn merkitys lämmön kuljettajana korostuu. Virtaus on molekyylivirtausta, eli molekyylien sattumanvaraista ja toisistaan riippumatonta kulkeutumista pienemmän tiheyden suuntaan. [8]

Kaasun tilan kriteerinä voidaan myös käyttää tuloa  $P \cdot d$ , sillä kaasumolekyylien keskimääräinen törmäysväli  $\langle \lambda \rangle$  on kääntäen verrannollinen kaasun kokonaispaineeseen  $P$  (yhtälö 2). Tämä voidaan tulkita niin, että kammion keskimääräinen halkaisija määrää painealueen, jossa muutos viskoottisesta tilasta molekyylitilaan tapahtuu. Jos kammion halkaisija on keskimäärin 10 cm, kuten IL:n laboratorion kammion, välitilan yläraja on noin 10 Pa ja alaraja noin 0,1 Pa. Jos kammion halkaisija on 1 cm, rajat saavutetaan kertalukua korkeammissa paineissa, ja vastaavasti jos halkaisija on 1 m, välitila sijoittuu kertalukua pienempiin paineisiin. [8]

## 2.2.2 Tyhjiöalueet

Tyhjiökäsite on laajuutensa vuoksi käytännöllistä jakaa eri alueisiin. Jako tehdään jäännöskaasun kokonaispaineen perusteella, kuten taulukossa 1 on esitetty.

Eri tyhjiöalueilla jäännöskaasun ominaisuudet ovat erilaiset ja tämä on otettava huomioon tyhjiösystemin suunnittelussa. Karkeatyhjiön alueella, eli myös Marspaineessa, jäännöskaasu on pääsääntöisesti viskoottisessa tilassa. Välytyhjiön alueella jäännöskaasu on välitilassa, muuttumassa viskoottisesta molekyyliseksi. Suurtyhjiön alueella jäännöskaasu on pääsääntöisesti molekyylitilassa. Hyvän suurtyhjiön ja ultratyhjiön alueella jäännöskaasu on molekyylitilassa ja tyhjiölaitteiston materiaali- ja tiiviysvaatimukset ovat suuremmat. Jäännöskaasun irrottaminen kammion seinämilta vaatii paahtamista, eli systeemin pitämistä 150-400°C lämpötilassa. [8]

Tyhjiöalueella on suuri merkitys virtauskanavien kaasunjohtavuuteen eli konduktanssiin. Kanava voi olla esimerkiksi yhdysputki, mutka- tai liitoskappale, venttiili



Taulukko 1: Tyhjiöalueet kokonaispaineen perusteella. [8]

Tyhjiöalue	hPa
Karkeatyhjiö	$10^3$ – 1
Välityhjiö	1 – $10^{-3}$
Suurtyhjiö	$10^{-3}$ – $10^{-6}$
Hyvä suurtyhjiö	$10^{-6}$ – $10^{-9}$
Ultratyhjiö	$10^{-9}$ – $10^{-12}$
Hyvä ultratyhjiö	$10^{-12}$ – ...

tai tyhjiökammio. Konduktanssi riippuu tyhjiöalueen lisäksi virtauskanavan geometriasta ja siitä, onko virtaus viskoottista vai molekyylistä virtausta. On huomioitava, että läpimitaltaan pienissä virtauskanavissa virtauksen muuttuminen molekyyliseksi tapahtuu korkeammassa paineessa, kuten edellisessä kappaleessa todettiin. Viskoottisen virtauksen tapauksessa konduktanssiin vaikuttaa myös paine-ero virtauskanavan päiden välillä. Suurempi paine-ero parantaa konduktanssia. Molekyylisessä virtauksessa molekyyliliike on satunnaista lämpöliikettä ja konduktanssi lasketaan tarkastelemalla molekyyliliikettä virtauskanavan läpi kumpaankin suuntaan. Konduktanssia voidaan parantaa kasvattamalla virtauskanavien läpimitaa ja lyhentämällä pituutta. [8],[9]

Marsin painealue sijoittuu karkean tyhjiön alueelle. Mars-alueella tyhjiökammion jäännöskaasu on vielä viskoottisessa tilassa. Yhdysputkissa kaasu voi olla viskoottisessa tilassa tai välitilassa paineesta ja putken halkaisijasta riippuen. Ohuissa virtauskanavissa tämä saattaa aiheuttaa virtauksen hidastumista. Paineinstrumenttien testeissä instrumenttia mitataan myös suurtyhjiössä. Tällöin jäännöskaasu on molekyylisessä tilassa.

### 2.2.3 Paineen mittaus

Paine kuvaa kaasun tai nesteen laajenemispyrkimystä suljetussa systeemissä, jossa paine syntyy molekyyliliikkeen törmätessä systeemiä rajoittavaan pintaan. Paine  $P$  määritellään pintaan kohdistuvan voiman  $F$  suhteena pinnan alaan  $A$ :

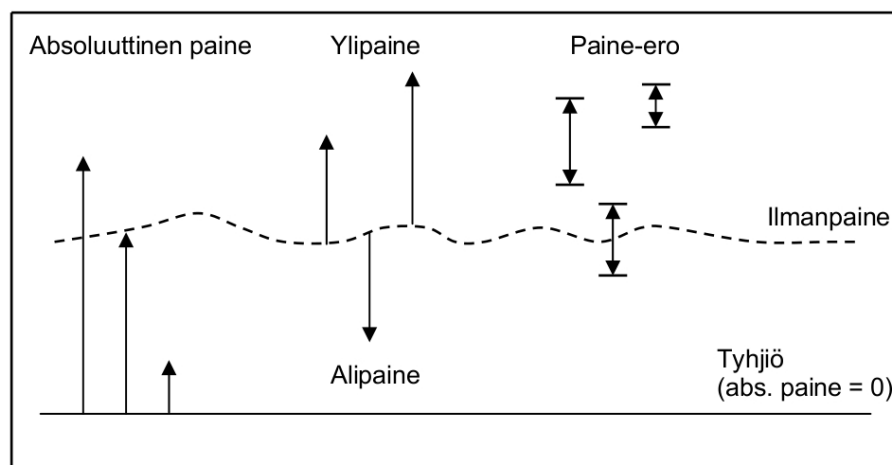
$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Paine on käytännöllisin suure kuvaamaan imetyn tyhjiön laatua. Tyhjiösysteemin tilavuudessa oleva kaasumäärä ilmaistaan usein tietyssä lämpötilassa mitattuna kokonaispaineena. Kaasun kokonaispaineella tarkoitetaan molekyylitörmäyksistä johtuvaa pinta-alayksikköön kohdistuvaa voimaa. [8]

Paineen SI-järjestelmän mukainen yksikkö on pascal (Pa). Yksi pascal on paine, jonka yhden newtonin suuruinen voima tasaisesti jakautuneena aiheuttaa yhden neliömetrin pinta-alalle, eli  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Pascal on pieni yksikkö, joten usein

käytetään kerrannaisia kuten hehtopascalia tai kilopascalia ( $1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa} = 1000 \text{ Pa}$ ). Paineen yksikkönä käytetään usein myös SI-järjestelmään kuulumatonta baaria (bar).

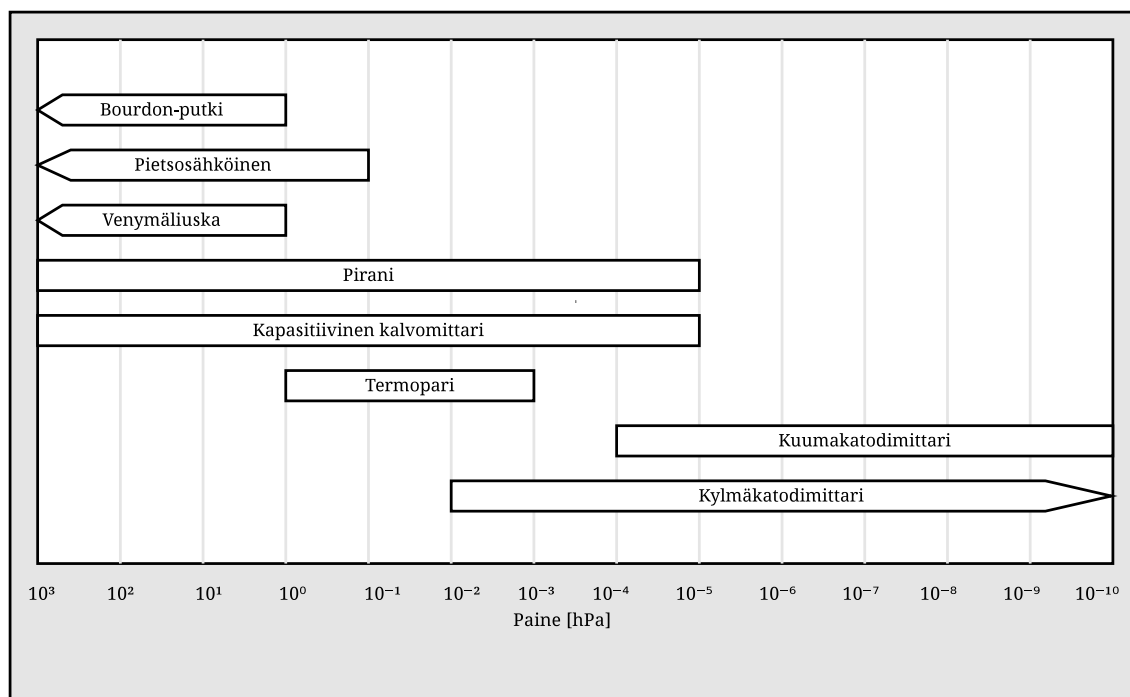
Paineen mittaaminen on käytännössä aina paine-eron mittaamista. Vertailupaineesta riippuen mitattaville paineille käytetään eri nimiä. Näitä eri painelukematyyppejä havainnollistaa kuva 2. Kun vertailupaineena on tyhjiö, painelukemaa kutsutaan absoluuttiseksi paineeksi. Tällöin painelukeman yhteydessä voidaan käyttää lyhennettä *abs* tai *a*, jos kyseessä on absoluuttinen paine. Vallitseva ilmanpaine tarkoittaa ilmakehän aiheuttamaa painetta verrattuna tyhjiöön ja siihen vaikuttavat paikalliset sääolosuhteet sekä mittauspäikan korkeus merenpinnasta. Vallitsevan ilmanpaineen mittareita kutsutaan barometreiksi. Ylipaineen ja alipaineen vertailupaineena on vallitseva ilmanpaine. Painelukeman yhteydessä voidaan käyttää sanaa *gauge* tai lyhennettä *g*, jos kyseessä on yli- tai alipaine. Yli- tai alipaine voidaan muuttaa absoluuttiseksi paineeksi lisäämällä siihen muunnoshetkellä vallitseva ilmanpaine. Paine-erosta puhutaan jos vertailupaineena on jokin muu paine kuin tyhjiö tai vallitseva ilmanpaine. Tässä opinnäytetyössä paine ilmoitetaan absoluuttisena paineena, ellei toisin mainita. [10]



Kuva 2: Erityyppiset painemittaukset. [10]

Mitattava painealue pelkästään IL:n Mars-paineinstrumenttien kehitykseen ja testaukseen liittyen on huomattavan laaja, huoneenpaineesta,  $10^3 \text{ hPa}$ , suurtyhjiöön,  $10^{-4} \text{ hPa}$ , asti. Näin laajaa aluetta ei voida mitata yhdellä painemittarilla, vaan eri painealueille on käytettävä erityyppisiä painemittareita. Kuvassa 3 on esitetty erityyppisten mittarien tyypillisiä mitta-alueita. Tässä kappaleessa esitellään erilaiset mittauseriaatteen ja tässä opinnäytetyössä oleelliset mittarityypit.

Paineastiassa olevan kaasun paine mitataan yksinkertaistettuna tuomalla anturille näyte kaasusta. Mittausmenetelmät voidaan jaotella suoriin ja epäsuoriin menetelmiin sen mukaan, mitaako anturi suoraan näytteen aiheuttamaa voimaa pintalakyksikköä kohti vai ilmiötä joka aiheutuu epäsuorasti näytteen käsittelystä. Kuvassa 4 on esitetty yleisimpien painemittarityyppien jaottelu toimintaperiaatteen mukaan. [8]



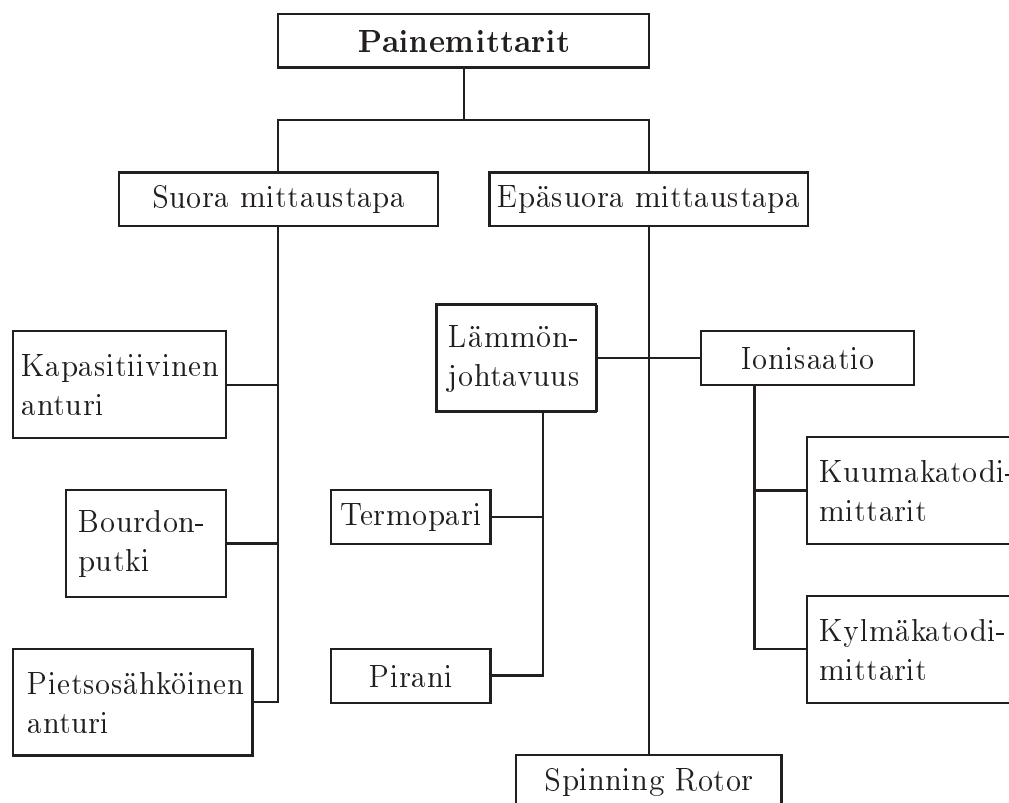
Kuva 3: Erityyppisten painemittareiden tyypillisiä käyttöalueita. [12]

Suoraan painemittaukseen perustuvissa mittareissa mitataan kaasun aiheuttamaa voimaa tietylle pinta-alalle paineen määritelmän mukaisesti (yhtälö 3). Tällaisia mittareita ovat painevaa'at, nestepatsasmanometrit, paineputkimanometrit, piettosähköiset anturit sekä kalvomittarit.

Painevaaka koostuu mäntä-sylinteriyhdistelmästä ja eri painoisista punnuksista. Painevaaka mittaa paine-eroa sylinterin päiden välillä, kun mäntä on tasapainotettu punnusten avulla. Tasapainotilanteessa mäntä-sylinteriyhdistelmän teholliselle pinta-alalle kohdistuva paine vastaa punnusten ja männän painosta aiheutuvaa voimaa. Painevaaoilla pystytään mittaamaan sekä ylipaineita että absoluuttipaineita. Samalla periaatteella toimii myös mäntämanometri, mutta siinä ei käytetä punnuksia vaan mäntään kohdistuva voima mitataan suoraan voima-anturin avulla. Paineen primäärinormaalit ovat yleensä painevaakoja. Paineen yksikkö alueella 3 Pa...500 MPa realisoidaan Mittatekniikan keskuksessa (MIKES) käyttäen painevaakoja ja mäntämanometreja. Ilmatieteen laitoksen referenssipainemittarit kalibroidaan MIKESillä tämänkaltaisia mittanormaaleja vastaan. [10]

Nestepatsasmanometrien toiminta perustuu hydrostaattiseen paineeseen. Tunnetuin nestepatsasmanometrimalli on U-putki. U:n muotoisen putken toisessa päässä on vertailupaine ja toisessa mitattava paine. Näiden välissä oleva neste liikkuu paineen mukaan. Paine-ero saadaan mittaamalla nestepintojen korkeusero. [10] Paineputkimanometrin tuntoelimenä on kimmoisa putki, jonka muoto muuttuu putken sisä- ja ulkopintojen paine-eron vaikutuksesta. Yleisin malli on Bourdon-putki. Putki on kiinnitetty mekaanisesti vipuun, joka välittää muodonmuutoksen osoittimeen. [8]

Piettosähköisessä anturissa paine-ero aiheuttaa mekaanisen voiman, joka puo-

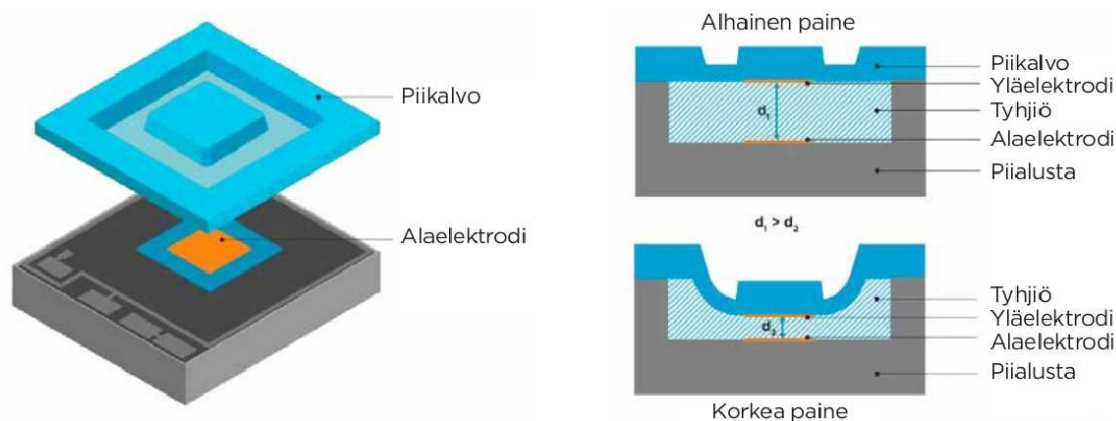


Kuva 4: Painemittarien luokittelu toimintaperiaatteen mukaan. Mittausperiaatteet voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin mittaus tapoihin. [9]

lestaan aiheuttaa pietsosähköisessä aineessa jännite-eron, joka voidaan mitata. [8] Kvartsikidemittarissa paineen muutos aiheuttaa vivuston kautta kvartsikiteeseen jännityksen, joka puolestaan aiheuttaa oskilloivan kiteen taajuuden muutoksen. [11]

Kalvomittarit mittaavat paine-eroa kalvon poikkeaman perusteella. Poikkeama voidaan mitata joko sähköisesti, optisesti tai mekaanisesti. Mekaaniset mittarit toimivat samalla periaatteella kuin Bourdon-putki. Sähköisiä kalvomittareita on erityyppisiä: kapasitiivisia, induktiivisia ja resistiivisiä. Käytetyin näistä on kapasitiivinen anturi, jossa kalvon taipuma aiheuttaa kalvon ja referenssielektrodin välisen kapasitanssimuutoksen. Myös Ilmatieteen laitoksen paineinstrumenttien paineanturit ovat kapasitiivisia antureita (kappale 2.1). Kapasitiivisen Barocap-anturin rakenne on esitetty kuvassa 5.

Epäsuoria paineenmittausmenetelmiä ovat lämmönjohtavuuteen, ionisaatioon ja impulssin siirtoon perustuvat mittausmenetelmät. Lämmönjohtavuuteen perustuvia mittareita on kahta tyyppiä: termopari ja pirani. Molemmat mittausperiaatteet perustuvat lankaan, jota lämmitetään sähkövirralla. Paine saadaan mittaamalla langasta kaasuun johtuvaa lämpöenergiaa, joka riippuu kaasumolekyylien määrästä. Mittausperiaatetta voidaan käyttää vain molekylaarisella alueella, sillä viskoosissa



Kuva 5: Kapasitiivisen Barocap-paineanturin rakenne. Kalvon liikkuttaessa elektrodien välinen etäisyys muuttuu jolloin myös anturin kapasitanssi muuttuu. [2]



(a) Bayard-Alpert-tyyppinen kuumakatodimittari. Kuvassa C on kollektori, F on katodi ja G anodi. (b) Penning-tyyppinen kylmäkatodimittari. Kuvassa A on anodi, C katodi, B kuvaa magneettikenttää, M on mittari, N ja S kestopäätteen navat ja R suojavastus.

Kuva 6: Esimerkkejä ionisaatiomittareista. [13]

tilassa molekyylin saadessa lämpöenergiaa se luovuttaa siitä osan viereiselle molekyylille ja syntyy lämpövirta, joka ei riipu molekyylien määrästä. Spinning Rotor -mittari perustuu kaasujen viskositeettiin, joka on paineriippuvainen alueella  $10^{-1} \dots 10^{-7}$  hPa. Paine mitataan tarkkailemalla magneettikentässä leijuvan teräskuulan pyörimisnopeuden hidastumista. [8]

Ionisaatiomittarit perustuvat siihen, että kaasua ionisoidaan jollain menetelmällä ja sen jälkeen mitataan syntyneiden ionien määrä. Kaasumolekyylin ionisoitumistodennäköisyys riippuu monesta tekijästä, joten ionisaatiomittarien herkkyyteen vaikuttaa muun muassa kaasun koostumus. Erilaisia mittariperiaatteita ovat purkausputki, kuumakatodimittarit sekä kylmäkatodimittarit. Purkausputki on hyvin yksinkertainen laite, jossa ionisaatio saadaan aikaan elektrodien väliin kytketyllä

suurjännitteellä joka aiheuttaa hohtopurkauksen. Purkauksen väristä saadaan tietoa paineesta ja kaasun koostumuksesta. Kuumakatodimittareissa ionisaatio saadaan aikaan kuumentamalla katodia jolloin siitä irtoaa elektroneja, jotka puolestaan ionisoivat kaasumolekyylejä. Syntyneet ionit kerätään kollektorille, jolloin ionivirta on suoraan verrannollinen paineeseen. Ionisaatiomittarit sopivat käytettäväksi matalissa paineissa, jolloin synnytytetyt ionit eivät törmää kaasumolekyyleihin ennen kuin ne pääsevät keräimelle. Tärkeimmät mittarityypit ovat triodi ja Bayard-Alpert. Kylmäkatodimittareissa ionisaatio saadaan alkuun esimerkiksi pommittamalla katodia ioneilla tai johtamalla siihen riittävän suuri jännite, jolloin katodilta irtoaa elektroneja. Elektronien kulkemaa matkaa on pidennetty magneettikentän avulla. Käytetyimmät mittarityypit ovat Penning ja käänteinen magnetroni. Tässä opinnäytetyössä käytetty tyhjiömittari on Penning-tyyppinen. Kuvassa 6a on esimerkki kuumakatodimittarista ja kuvassa 6b kylmäkatodimittarista. [8],[13]

## 2.2.4 Tyhjiöpumput

Tyhjiöpumppu on tyhjiötekniikan tärkein komponentti. Pumppuja saatetaan tarvita tyhjiölaitteistossa useampi kuin yksi riippuen halutusta tyhjiöalueesta. Esimerkiksi tätä opinnäytetyötä tehdessä tarvittiin kahta erityyppistä tyhjiöpumppua. Tässä kappaleessa kerrotaan tyhjiöpumpuista vain hyvin lyhyesti keskittyen tässä työssä käytettyihin pumpputyyppeihin.

Pumpun tehtävä on annetussa tilavuudessa, yleensä tyhjiökammiossa, olevan paineen pienentäminen. Usein ajatellaan virheellisesti, että pumput imevät kaasua jostain tilavuudesta. Sellaista voimaa kuin imu ei kuitenkaan ole olemassa. Vasta, kun molekyylillä, joka törmäilee kaasussa satunnaisesti, kulkeutuu pumpun pumppausmekanismiin, se voidaan poistaa pumpattavasta tilavuudesta. Kun suljetun tilavuuden yhdestä osiosta poistetaan kaasumolekyylejä, loput kyseiseen osioon jääneet molekyylit törmäilevät ja kimpoilevat seinästä normaalisti täyttäen koko tilavuuden, mutta paine on nyt alhaisempi. [8]

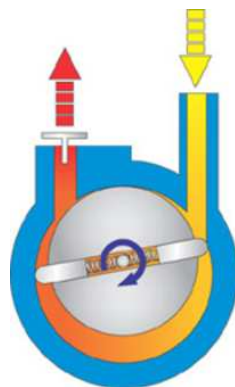
Pumput luokitellaan yleisimmin sen fysikaalisen tai kemiallisen ilmiön perusteella, mihin pumpun toiminta perustuu. Monet pumput tosin käyttävät useampaa kuin yhtä mekanismia. Taulukossa 2 on lueteltu erilaiset pumpputyypit ja niiden toimintamekanismit.

Mekaaniset pumput sekä ajoaine- ja turbopumput ovat kaasunsiirtopumppuja, jotka puristavat kaasut pienempään tilavuuteen tyhjiötilan ulkopuolelle. Sorptio-, ioni-, kryo- ja höyrystyspumppuja kutsutaan sieppauspumpuiksi, sillä ne sieppaavat kaasut kiinteälle pinnalle tyhjiötilan sisällä. Kaasunsiirtopumppuja käytetään yleensä suurille kaasumäärille ja sieppauspumput soveltuvat öljyttömien tyhjiöiden ja ultratyhjiöiden pumppaamiseen. [8],[12]

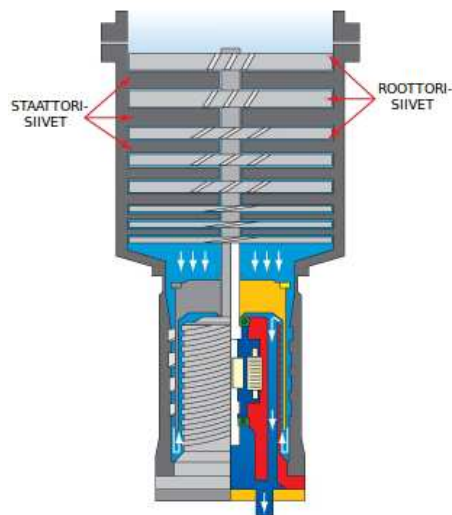
Mekaaniset pumput sopivat suurienkin kaasumäärien pumppaamiseen karkeaan tyhjiöön ja välityhjiöön. Mekaanisista pumpuista yleisin on kiertosiipipumppu, jollainen kuuluu myös IL:n laboratorion laitteistoon. Kiertosiipipumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7. Pumpun tiivistämiseen, jäähdyttämiseen ja voiteluun käytetään öljyä.

Taulukko 2: Tyhjiöpumpputyypit

Tyyppi	Mekanismi
Mekaaninen	Kaasun puristus
Ajoaine	Molekyylien väliset törmäykset
Turbo	Molekyylien törmäykset pintaan
Sorptio	Fysikaalinen tai kemiallinen absorptio
Ioni	Kaasun ionisaatio
Kryo	Molekyylien sieppaus kylmälle pinnalle
Höyrystys	Fysi- tai kemisorptio



Kuva 7: Kiertosiipipumppu. Kaasu tulee imukammioon kuvassa oikealta ja puristuu siiven pyöriessä. Kaasu poistuu pumpusta vasemmalta. [12]



Kuva 8: Hybridipumppu, jossa ensimmäinen vaihe on turbopumppu. Turbopumpun siipipyörästä muuttuu kaasumolekyylien liikemäärää siten, että ne kulkeutuvat pumpun läpi. Kaasu virtaa kuvassa ylhäältä alas. [12]

Matalampiin paineisiin päästään lisäämällä tyhjiösystemiin toinen pumppu. Yleistäen voidaan sanoa, että jos vaadittava paine on alle  $10^{-4}$  hPa, on käytettävä enemmän kuin yhtä pumppua. Ilmatieteen laitoksen laboratoriossa toisena pumppuna on turbomolekyylipumppu, lyhyemmin turbopumppu. Turbopumpussa on turbiinia muistuttava siipipyörästä, joka muodostuu roottori- ja staattoriivistä. Siivekkeet pyörivät suurella nopeudella ja muuttavat kaasumolekyylien liikemäärä siten, että niillä on suurempi todennäköisyys kulkea pumpun läpi. Siipipyörästäön nopeuden on oltava samaa luokkaa kuin molekyylien termisen nopeuden, jolloin turbopumpun pyörimisnopeudeksi tulee 15 000...60 000 kierrosta minuutissa. Turbopumpulla on mahdollista päästä jopa  $10^{-10}$  hPa:n tyhjiöön, mutta käytännössä tämä riippuu tyhjiösystemistä. [12]

### 2.2.5 Paineensäätö

Paineensäätöprosessi etenee pääpiirteittään niin, että säädettävään testitilavuuteen on sijoitettu painemittari, joka mittaa tilavuuden painetta. Painemittarilta kulkee sähköinen signaali säätimelle ja säätäjä vertaa painemittarin signaalia asetettuun painearvoon. Jos painemittarin paine on määritetyn toleranssin päässä asetetusta paineesta, säätöä ei tehdä. Jos taas painemittarin signaali poikkeaa liikaa asetetusta paineesta, lähetetään säätimen käyttölaitteelle signaali säätää testitilavuuden painetta kohti haluttua arvoa. [9]

Prosessi- ja valmistustekniikassa säädin on yleisesti joko massavirtaussäätäjä tai kuristusventtiili. Massavirtaussäätäjä sijoitetaan ennen prosessikammiota säätämään kaasun pääsyä kammioon, kun taas kuristusläppä sijoitetaan prosessikammion jälkeen säätämään kaasun pääsyä pois kammioista. Kaasun pääsyä pois kammioista voidaan säätää myös vaihtelemalla tyhjiöpumpun pumppausnopeutta. [9]

Massavirtaussäätäjä perustuu termiseen massavirtausmittariin johon on lisätty venttiili ja elektroninen säätäjä. Terminen massavirtausmittari mittaa anturin läpi menevän kaasun molekyylimäärän kaasun kuljettamaan lämpömäärään perustuen. Mittari sisältää kaksi itselämmittävää elementtiä, esimerkiksi platinavastuslankaa, joiden lämpötila pyritään pitämään vakiona säätämällä elementeille menevää tehoa. Massavirtaus on tällöin verrannollinen tehonkulutukseen. Massavirtausmittarin rakenne on esitetty kuvassa 9a. Kuvassa 9b on esimerkki kaupallisesta massavirtaussäätäjästä. [8]

Edellä esitettyjen säätömenetelmien tarkoitus on tasapainottaa tyhjiökammioon tulevan ja sieltä lähtevän kaasun määrä siten, että kammio pysyy halutussa paineessa. Näillä menetelmillä on kuitenkin vaikeaa saada aikaan niin pieniä paineen muutoksia ja tarkkaa paineen kontrollointia kuin IL:n kalibrointilaboratoriossa tarvitaan. Paremman käsityksen paineensäädöstä IL:n tarpeisiin saa esimerkkien avulla, sillä ainoastaan yhtä oikeaa toteutustapaa ei ole olemassa. Yksi esimerkki on luonnollisesti IL:n nykyinen paineensäätöjärjestelmä, joka esitellään kappaleessa 2.3. Sen lisäksi tätä opinnäytetyötä tehtäessä käytiin tutustumassa Mittatekniikan keskuksen painelaboratorioon ja siellä käytössä oleviin paineensäätimiin. Oppaana toimi paineen vastuuhenkilö, erikoistutkija Sari Saxholm.

Mittatekniikan keskus on kansallinen metrologialaitos ja toimii kansallisena mit-





tanormaallilaboratoriona pituudessa, massassa, paineessa, lämpötilassa, kosteudessa, kaasuvirtauksessa, sähkösuureissa, aika- ja taajuussuureissa, akustisissa suureissa, voimassa ja vääntömomentissa [14]. MIKESillä tehdään näiden suureiden erikoistarkkuutta vaativien mittauslaitteiden kalibroinnit, myös Ilmatieteen laitoksen painereferenssien kalibrointi. MIKESin laboratorioissa SI-mittayksikköjärjestelmän määritelmien mukaiset suureiden arvot toteutetaan kansallisilla mittanormaaleilla, jotka tarjoavat luotettavan lähtökohdan mittaustulosten metrologiselle jäljitettävyysetjulle. Jäljitettävyysetju muodostuu mittanormaalien ja kalibrointien sarjasta, jonka avulla mittaustulos yhdistetään SI-mittayksikköjärjestelmän mukaiseen määritelmään. Ketjun jokainen vaihe vaikuttaa mittausepävarmuuteen, joka ilmoitetaan mittaustulosten yhteydessä. Jäljitettävyys on edellytys mittaustulosten luotettavuudelle ja vertailtavuudelle. [15]

MIKESin paineensäätimet ovat hyvä esimerkki siitä, kuinka todella tarkka paineen kontrollointi etenkin matalissa absoluuttipaineissa on mahdollista toteuttaa kaupallisilla järjestelmillä. MIKESin paineensäätöjärjestelmät olivat kertaluokkaa korkeammassa hintakategoriassa kuin mitä IL:n uudelle paineensäätimelle määriteltiin, joten ne toimivat tässä työssä vain esimerkkeinä.

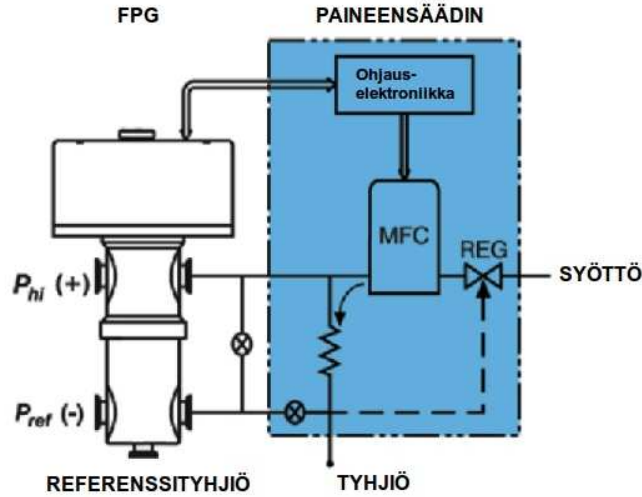
Pienten absoluuttipaineiden mittanormaalina MIKESillä on käytössä painevaaka DHI FPG8601 (kuva 10), jonka mittausalue 0...15 kPa. Painevaa'assa on mukana tietokoneen avulla ohjattava paineentuottoyksikkö DHI VLPC ja tiedonkeruuohjelmisto, jotka mahdollistavat kalibraatiosekvenssien ohjelmoimisen ja automaattisten suorittamisen. FPG8601-painevaaka on kaupallinen ja todella korkeatasoinen järjestelmä. Painevaa'alla pystytään mittaamaan sekä ylipaineita, absoluuttipaineita että paine-eroa. [16]



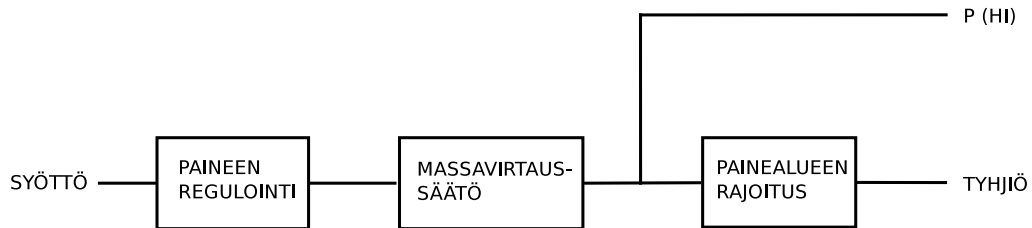
Kuva 10: Kuvassa vasemmalta oikealle: mittaustietokone, FPG8601-painevaaka ja VLPC-paineentuottoyksikkö. [16]

Kuvassa 11 on esitetty FPG8601-painevaa'an toimintaperiaate yksinkertaistettuna. Painevaa'an mäntä on yhdistetty voima-anturiin, joka mittaa mäntään kohdistuvan suhteellisen voiman. Kun mäntä-sylinteriyhdistelmän efektiivinen pinta-ala tunnetaan, voidaan määrittää paine  $P_{hi}$  paineen määritelmän avulla (yhtälö 3 sivulla 9). Absoluuttimittauksissa referenssipaineena  $P_{ref}$  on tyhjiö, jonka hyvyys mi-

tataan erillisellä tyhjiömittarilla. VLPC-paineentuottoyksikön tehtävänä on tuottaa painevaa'alle haluttu paine  $P_{hi}$ . Yksikön toiminta perustuu massavirtauksen säätöön kuristuselimien yli. VLPC:n toiminta on esitetty lohkokaaviona kuvassa 12. Paineensäätö tehdään perustuen asetetun paineen ja painevaa'an lukemien eroon. [16]



Kuva 11: FPG8601-painevaa'an toimintaperiaate. Määritettävä paine on  $P_{hi}$  ja vertauspaine  $P_{ref}$ . [16]



Kuva 12: VLPC-paineentuottoyksikön toimintaperiaate absoluuttipaineissa. [17]

Paineentuottoyksikköön syötetään puhdasta ja kuivaa kaasua, jonka on paineistettu 700...840 kPa ylipaineeseen. Kaasu kulkee suodattimen läpi kaksiosaisen regulaattorin (kuvassa *REG*) ensimmäiseen vaiheeseen jossa paine lasketaan 200 kPa:iin ylipainetta. Ensimmäinen regulaattori syöttää toista regulaattoria, jossa painetta lasketaan niin että  $P_{hi}$  ja  $P_{ref}$  -puolien välillä on 100 kPa:n paine-ero, koska 100 kPa:n paine-eron on todettu tuottavan stabiileimman virtauksen. Absoluuttipaineita tuottaessa syöttöpaine on tässä vaiheessa siis 100 kPa absoluuttista painetta. Massavirtausta säädetään kahdella rinnakkainkytketyllä massavirtaussäätäjällä (kuvassa *MFC*). Toinen säätäjistä on karkeaa säätöä varten ja toinen hienosäätöön. Kun tasainen, halutun suuruinen massavirta on saavutettu, haluttu paine  $P_{hi}$  saadaan paine-erona kuristuselimien yli. [17]

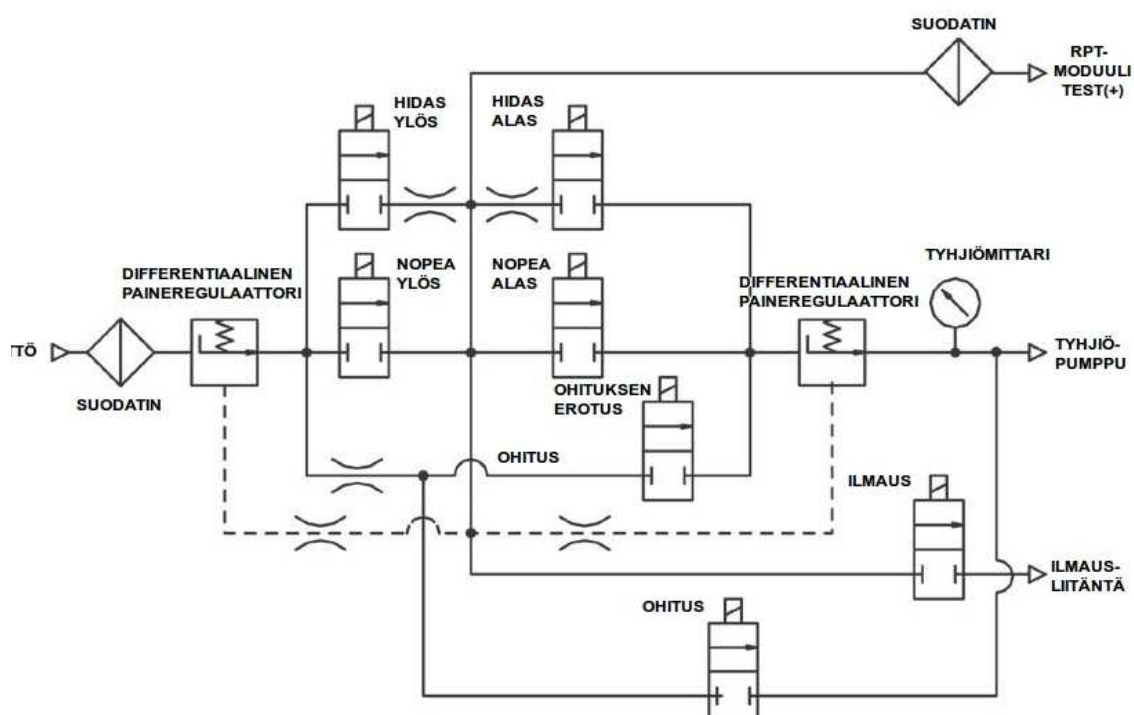
Toinen MIKESin painelaboratoriossa käytössä oleva pienten absoluuttipaineiden paineensäädin on Fluke DHI PPC4 (kuva 13). Säädetty painealue riippuu asennetuista referenssimittareista, mutta alin mahdollinen säädetty paine on 1 kPa, eli se ei aivan sovellu Mars-paineille.



Kuva 13: PPC4-paineensäädin. Kuvassa vasemmalla etupaneeli ja oikealla takapaneeli, jossa paineliitännät sijaitsevat. [19]

PPC4:n toimintaperiaate poikkeaa VLPC-säätäjistä. Referenssipainemittarina toimii yksi tai useampi kvartsikidemittari Q-RPT (*Quartz Reference Pressure Transducer*), jotka sijaitsevat erillisessä RPT-moduulissa. PPC4:n paineensäätömoduuli perustuu solenoidiventtiileihin ja differentiaalsiin paineregulaattoreihin, eli eräänlaisiin säätöventtiileihin. Paineensäätömoduulin lohkokaavio on esitetty kuvassa 14. Säädetty paine on kuvassa *TEST(+)*, joka säätömoduulin jälkeen mitataan RPT-moduulissa. Solenoidiventtiilejä on kaksi sekä paineen ylös- että alaspäin säätöön. Lisäksi säätömoduuliin kuuluu kolme muuta venttiiliä eri tarkoituksiin. Kaikki venttiilit ovat normaalisti kiinni. Paineregulaattoreissa on takaisinkytkentä, jota käytetään säilyttämään vakio paine-ero venttiilin yli. Jos siis paine esimerkiksi nousee alavirran puolella, regulaattori reagoi siihen muuttamalla virtausta niin että paine-ero pysyy vakiona. [18]

Vierailu MIKESillä osoitti, että paineensäätö matalissa absoluuttipaineissa on todella mahdollista toteuttaa kaupallisilla järjestelmillä. Opittiin myös, että kaupallisten paineensäätöjärjestelmien toimintaperiaatteita on erilaisia ja hinnat vaihtelevat paljon. Vaihtoehtojen selvitys ja paineensäätimen valintaprosessi kuvaillaan kappaleessa 3.2, jossa listataan myös useita paineensäätimien valmistajia.

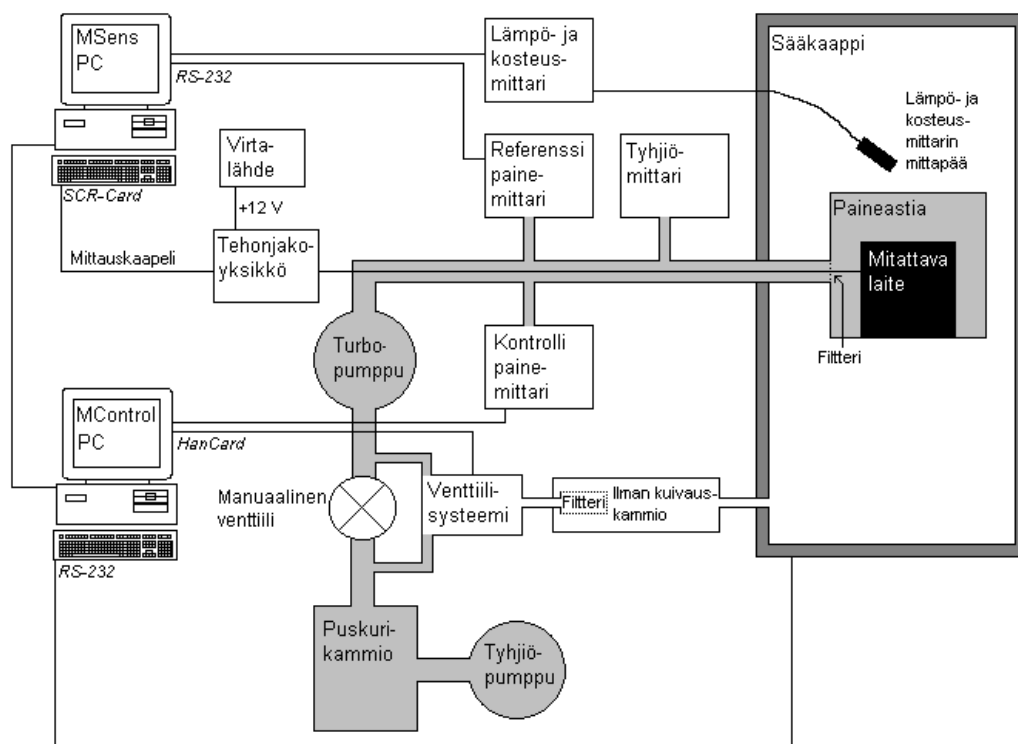


Kuva 14: PPC4-säätimen paineensäätömoduulin lohkokaavio. [18]

## 2.3 Nykyinen painekalibrointijärjestelmä

Ilmatieteen laitoksen avaruuslaboratorion painekalibrointijärjestelmä on palvellut hyvin avaruusinstrumenttien testauksessa jo yli 20 vuotta. Ohjelmiston on kehittänyt Asko Lehto ja laitteiston Hannu Sinivirta. Suurin syy järjestelmän uusimiseen onkin käyttönsä päättymisen ja laboratorion modernisointi. Tässä osiossa esitellään nykyinen painekalibrointijärjestelmä sekä laitteisto, jota käytettiin tämän opinnäytetyön puitteissa.

IL:n avaruuslaboratoriossa voidaan testata elektronisten laitteistojen ja komponenttien toimintaa erilaisissa olosuhteissa. Muunneltavia testiolosuhteita ovat lämpötila, ilmankosteus ja paine. Halutut testiolosuhteet generoidaan sääkaapin ja paineensäätöjärjestelmän avulla. Sääkaapin avulla voidaan muuttaa lämpötilaa ja ilmankosteutta. Sääkaapin sisään voidaan laittaa paineastia, jonka sisäisen paineen muuttamisesta huolehtii paineensäätöjärjestelmä. Laitteistoon kuuluu lisäksi erilaisia mittareita, joita voidaan käyttää esimerkiksi referensseinä antureita kalibroitaessa. Koko järjestelmää, sisältäen sekä paineensäädön että sääkaapin kontrolloinnin, ohjataan MControl-ohjelman avulla yhdeltä tietokoneelta. Mittausdatan keräämisestä ja käsittelemisestä huolehtii toinen tietokone, jossa käytetään MSens-ohjelmaa. MControl- ja MSens-koneet voidaan ohjelmoida tekemään mittaukset automaattisesti. Avaruuslaboratorion yksinkertaistettu lohkokaavio on esitetty kuvassa 15. [22]



Kuva 15: Avaruuslaboratorion lohkokaavio. [20]

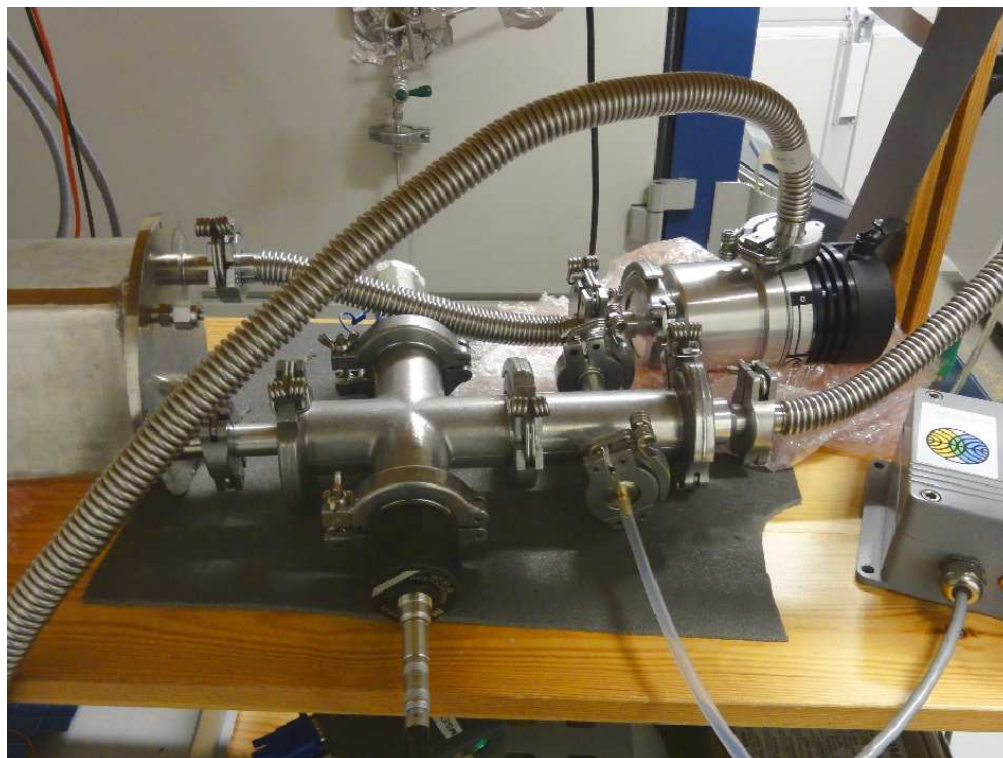
### 2.3.1 Paineensäätöjärjestelmä

Paineensäätöjärjestelmä muodostuu kuvan 15 mukaisesti tyhjiö- ja turbopumpusta, puskurikammioista, MControl-tietokoneen ohjaamasta venttiilisysteemistä ja kontrollipainemittarista, jonka avulla MControl saa tiedon paineesta paineastian sisällä. Painesysteemin kokonaistilavuus on noin 5 litraa. Kontrollipainemittarina käytetään yleensä MCap-mittaria, joka on rakennettu Ilmatieteen laitoksella tätä tarkoitusta varten. Venttiilisysteemi koostuu kuudesta solenoidiventtiilistä ja niiden ohjausjärjestelmästä. Venttiilit näkyvät kuvassa 16. Venttiilien ohjausjärjestelmä on kytketty MControl-tietokoneeseen erityisen Han-Card -lisäkortin avulla. MControl-ohjelma seuraa painesysteemin painetta kontrollipainemittarin avulla ja tarvittaessa lähettää signaalin venttiilien avaamisesta ohjausjärjestelmälle. Uudella paineensäätimellä on tarkoitus korvata venttiilisysteemi ja venttiilien ohjausjärjestelmä. Sääkaapin ohjausta ei vaadita, vaan se tullaan toteuttamaan muilla keinoilla tulevassa kalibrointilaitteistossa. [22],[21]



Kuva 16: Venttiilisysteemi ja puskurikammio. Vasemmassa alareunassa näkyy myös tyhjiöpumppu.

Tyhjiöpumppu pitää paineen puskurikammiossa mahdollisimman alhaalla. Manuaalinen venttiili on paineensäädön aikana kiinni, eli kaasu voi virrata ainoastaan venttiilisysteemin kautta. Paineastian sisälle luodaan halutun suuruinen alipaine siten, että venttiilijärjestelmä laskee ilmaa tarpeen mukaan paineastiasta puskurikammioon tai päästää sääkaapista otettua lisäilmaa paineastiaan. Lisäilma otetaan sääkaapin sisältä ilman kuivauskammion kautta, jolloin kaasu on samassa lämpötilassa



Kuva 17: Painejärjestelmän mittarit, turbopumppu (kuvassa oikealla) ja mittajoh-tojen läpivientikammio (kuvassa vasemmalla). Kuvan oikeassa reunassa näkyy refe-renssimittari Vaisala PTB201 Special. X-malliseen yhdysputkeen on liitetty alapuo-lle tyhjiömittapää PR35 ja yläpuolelle MCap-mittari. Oikean reunan yhdysputki johtaa sääkaapissa olevaan tyhjiökammioon.

kuin painesysteemin kaasu. Tällöin vältetään esimerkiksi kondensaatio-ongelmilta matalissa lämpötiloissa. Avaruuslaitteet on pidettävä puhtaana myös testien aika-na, joten laitteistoon kuuluu filtti, eli suodatin, sekä korvausilman sisääntulossa että tyhjiökammion ja muun laitteiston välissä. Jos tarvitaan ylipainetta, voidaan venttiilijärjestelmän yläpainepuolelle asentaa kompressori. Turbopumppu ja muuta paineensäätöjärjestelmän laitteistoa näkyy kuvassa 17. [22]

Pelkästään tyhjiöpumpun avulla päästään jonkin verran alle 0,5 hPa:n paineen. Paras tyhjiö, joka tyhjiöpumpun avulla voidaan saavuttaa, riippuu paineastian koos-ta ja sen sisällöstä. Käytetyt materiaalit vaikuttavat pumppuun kohdistuvaan kaa-sukuormaan. Tarvittaessa suurempia tyhjiöitä avataan manuaaliventtiili ja käynnis-tetään turbopumppu. Turbopumpun ollessa päällä venttiilijärjestelmä on ohitettu manuaaliventtiilillä, eikä painetta voi säätää. Turbopumppua ei voi kytkeä auto-maattisesti päälle ja pois, vaan se on tehtävä käsin. Automaattisesti voidaan siis mitata joko sitä painealuetta, johon tyhjiöpumpulla päästään, tai maksimityhjiötä turbopumpun ollessa käytössä. Turbopumpulla päästään noin  $10^{-4}$  hPa:n paineeseen riippuen laitteiston kokoonpanosta. [22]



### 2.3.2 Ohjelmistot

Molempien tietokoneiden käyttöjärjestelmänä on MS-DOS. MControl- ja MSens-ohjelmistot on tehty Turbo Pascal 6.0 kääntäjällä. MControl on kehitetty automaatioimaan sääkaapin käyttö ja paineensäätö erilaisissa testaustehtävissä. MControl ohjaa sääkaappia sarjaliikenneportin kautta ja venttiilijärjestelmää tietokoneeseen asennettavan Han-Card -lisäkortin kautta. Instrumenttien testejä varten MControl kytketään sarjaliikenneportin kautta siihen tietokoneeseen, jossa ajetaan MSens-ohjelmaa. Manuaalisessa toimintatilassa MControl ohjaa järjestelmää lukemalla käyttäjän antamat käskyt näppäimistöltä ja lähettämällä ne välittömästi säätöjärjestelmälle. Käyttäjä voi asettaa arvoja parametreille lämpötila, kosteus ja paine. Automaattisessa toimintatilassa MControl lukee käskyt käyttäjän etukäteen kirjoittamasta tiedostosta. Automaattisissa mittauksissa MControl-kone toimii isäntänä. MSens-kone aloittaa mittauksen vasta, kun MControl-kone on saanut muutettua olosuhteet mittauksen aloittamiseen sopiviksi ja lähettää viestin *stable*. Jokaisen mittauskierroksen lopussa MSens lähettää MControlille viestin *done*. Tämän viestin saatuaan MControl alkaa säätämään mittausolosuhteita kohti seuraavan kierroksen arvoja sen mukaan, mitä sen ohjaustiedostoon on kirjoitettu. MSens aloittaa seuraavan kierroksen mittaamisen taas sen jälkeen, kun on saanut MControlilta viestin *stable*.

### 2.3.3 Uusi MSens

Vanhalle MSens-ohjelmalle on kehitetty korvaava mittausohjelma, uusi MSens. Se on kirjoitettu Tcl/Tk -ohjelmointikielellä ja on asennettuna laboratorioon kannettavalle tietokoneelle. Uusi MSens tulee korvaamaan vanhan MSensin mittausohjelmana ja mittautietokoneena. Käyttöönotto on jo aloitettu ja uudella MSensillä on suoritettu avaruusinstrumenttien mittauksia kalibrointitestien aikana. Testiolosuhteiden säätö on mahdollista tehdä edelleen MControlilla yhdistämällä se uuteen MSensiin, mutta tätä ominaisuutta ei ole vielä otettu täysin käyttöön. Sekä vanhaa että uutta MSens-ohjelmaa käytettiin tässä opinnäytetyössä referenssipainemittarien lukemiseen.

### 2.3.4 Referenssimittarit

Alla on esitelty tässä opinnäytetyössä käytetyt referenssipainemittarit.

#### Vaisala PTB201 Special

- Tyyppi: Kapasitiiviseen anturiin perustuva digitaalinen barometri.
- Sarjanumero: 560076
- Mittausalue: 0 ... 600 hPa. Optimoitu alueelle 0 ... 14 hPa.
- Paineliitännän tyyppi: DN16KF-laippa

PTB201 Special on Vaisala Oyj:n erikoistilaustyönä valmistama digitaalinen barometri. PTB201:n lukema voidaan lukea ja tallentaa avaruuslaboratorion mittautietokoneella RS-232 -sarjaliikenneyhteyden kautta. PTB201:n kalibroidut lukemat saadaan yhtälöstä

$$P_{cal} = P_{raw} + P_{cor} - P_0, \quad (4)$$

jossa  $P_{cal}$  on kalibroitu painelukema,  $P_{raw}$  on referenssimittarin raakalukema,  $P_{cor}$  paineen korjaus ja  $P_0$  on korjaustermi.  $P_{cor}$  lasketaan yhtälöstä

$$P_{cor} = f_0 + f_1 P_{raw} + f_2 P_{raw}^2 + f_3 T_{ref} + f_4 T_{ref} P_{raw} + f_5 T_{ref}^2 + f_6 T_{ref}^2 P_{raw}, \quad (5)$$

jossa  $f_i$  ovat kalibraatiokertoimet ja  $T_{ref}$  on PTB201:n sisäinen lämpötila. Kalibraatiokertoimet määritellään uudestaan jokaisen kalibroinnin yhteydessä. Tässä opinäytetyössä on käytetty vuonna 2009 määritettyjä kertoimia. Kalibrointi on voimassa vain Mars-alueella. Tässä työssä esiintyvät PTB201:n lukemat ovat kalibroituja, jos ei toisin mainita. [20]

### Vaisala PTU200

- Tyyppi: Yhdistetty paine-, kosteus- ja lämpötilamittari.
- Sarjanumero: X5120001
- Mittausalue: Paine: 50...1100 hPa.
- Paineliitännän tyyppi: DN16KF-laippa

PTU200 on korkeiden paineiden mittareferenssi. Tätä painereferenssiä käytettiin korkean painealueen testissä, koska PTB201:n kalibrointi ei ole voimassa kuin Mars-alueella. Mittarissa on digitaalinen ulostulo, joten myös PTU200:n painelukema voidaan lukea ja tallentaa mittautietokoneelle. Myös PTU200 on kalibroitu vuonna 2009. [23]

### Leybold Combitron CM330 + Penningvac PR35

- Tyyppi: Penning-tyyppinen tyhjiömittari
- Sarjanumero: CM330: 16276 D 91 13 00173, PR35: 911181721.
- Mittausalue:  $10^{-9}$ ... $10^{-2}$  hPa
- Paineliitännän tyyppi: DN40KF-laippa

Penningvac-mittapää on tarkoitettu hyvin matalien paineiden mittaamiseen. Mittapää luetaan Combitron-anturiohjaimella. Mittaria käytetään tyhjiön hyvyyden arvioimiseen, lukemat eivät ole kalibroituja. Combitron-mittaria ei kytkeä mittautietokoneeseen, vaan paine luetaan suoraan laitteen osoitinpaneelistä. [23]

## 3 Vaatimusten määrittely ja aineiston keräys

### 3.1 Vaatimukset uudelle järjestelmälle

Uuden painesäätimen vaatimukset muodostettiin perustuen vanhaan MControl- järjestelmään ja paineinstrumenttien testivaatimuksiin. Yksinkertaistettuna uudella säätimellä täytyy pystyä suorittamaan samat asiat kuin vanhallaakin säätimellä. Uudelta säätimeltä ei kuitenkaan vaadita identtistä suorituskkyä, esimerkiksi nopeutta, vanhaan järjestelmään verrattuna, eikä uutta säädintä verrata käyttötesteissä suoraan MControlin paineensäätöjärjestelmään.

Uuden paineensäätimen on oltava toimintaperiaatteeltaan saman tyyppinen kuin vanha järjestelmä, jotta se voitaisiin liittää nykyiseen painelaitteistoon. Täysin uudenlaisen säätöjärjestelmän kehitys on siis rajattu pois. Toimintaperiaatteella tarkoitetaan tässä sitä, että painekammion painetta muutetaan joko päästämällä kuivaa ilmaa sisään kammioon tai päästämällä kammiossa olevaa ilmaa tyhjiöpumpulle.

Paineensäätimen on toimittava painealueella 0...1000 hPa, etenkin Mars-alueella. Nolla tarkoittaa käytännössä alle 0,5 hPa:n painetta ilman manuaaliventtiilin avaus- ta. Noin 0,5 hPa riittää myös, sen alemmas ei ole pakollista päästä. Suurtyhjiöön säätimen ei tarvitse pystyä säätämään, suurtyhjiö saadaan aikaiseksi ohittamalla säädin manuaaliventtiili avaamalla ja käynnistämällä turbopumppu. Säätimen on oltava alipainetiivis sekä Mars-paineessa että suurtyhjiössä. On mahdollista, että tulevaisuudessa tarvitaan laajempaa painealuetta, mutta se on jätetty tämän opin- näytetyön ulkopuolelle. Mahdollisuus ylipaineikäyttöön tai säätimen painealueen laajennuksen kuitenkin huomioidaan.

Suorituskyvyn vaatimukset perustuvat absoluuttisen tarkkuuden, toistettavuuden ja stabiiliuden suhteen paineinstrumenttien mittauksien vaatimuksiin [7]. Tarkkuus tarkoittaa eroa suhteessa referenssipainemittariin. Mars-alueella tarkkuusvaatimus on 50 Pa ja korkeammissa paineissa 10 hPa. Toistettavuus tarkoittaa saman painepisteen eri mittauksen eroa lyhyellä aikavälillä esimerkiksi yhden testin aikana, jossa paine muuttuu sekä ylös- että alaspäin. Vaatimukseksi toistettavuudelle asetettiin 50 Pa. Toistettavuus on paineensäätimeltä tärkeämpi ominaisuus kuin absoluuttinen tarkkuus. Tämä johtuu siitä, että paineinstrumentit kalibroidaan koko Marsin painealueelle eikä sillä ole merkitystä, onko kalibroinnissa käytetty yksittäinen painepiste tasan 8,0 hPa vai vaikka 8,5 hPa, kunhan käytetty paine tiedetään. Instrumenttien kalibroinnissa käytetään aina jäljitettävien referenssipainemittarien lukemia, eikä paineensäätimen antamia lukemia. Paineinstrumentin mittauksen aikana painekammion paineen on pysyttävä hyvin stabiilina, mikä saavutetaan helpoiten sulkemalla säätöventtiilit. Tämä mahdollisuus venttiilien sulkemiseen tulisi löytyä.

Painetta on pystyttävä muuttamaan pienin askelin paineesta toiseen. Paineinstrumenttien testeissä askel on yleensä 1 tai 2 hPa. Mahdollisuus pieniin paineen muutoksiin saattaa rajoittaa paineensäätimen nopeutta, riippuen venttiilien koosta. Säätönopeudelle on vaikeaa antaa ehdotonta alarajaa, mutta keskimäärin paineesta toiseen säädön tulisi tapahtua alle 10 minuutissa.

Etäkäytettävyys esimerkiksi USB:n tai sarjaportin avulla on tärkeä vaatimus.

Etäyhteyden yli paineensäätimelle on pystytettävä asettamaan tavoitepaine, ja säätimen on kyettävä lähettämään signaali siitä, että paine on saavutettu. Nämä ominaisuudet mahdollistavat paineensäädön automaattisen suorituksen.

Paineensäätimen on kyettävä toistamaan kaikki paineinstrumenteille tehtävät testit. Nämä testit on lueteltu aiemmin kappaleessa 2.1.2. Säätimen on myös oltava toiminnaltaan luotettava. Tällä tarkoitetaan sitä, että useiden viikkojenkin mittaiset testit on saatava suoritettua ilman häiriöitä tai keskeytyksiä. Luotettavuus varmistetaan paineensäätimen käyttötestien yhteydessä. Säätimelle määritettiin myös sopiva hintaluokka. Uudelle paineensäätimelle asetetut vaatimukset on kerätty taulukkoon 3.

Taulukko 3: Vaatimukset uudelle paineensäätimelle taulukoituna. Vaatimukset eivät ole tärkeysjärjestyksessä.

Nro	Vaatimus
1	Liitettävissä nykyiseen painelaitteistoon
2	Säädettävä painealue 0...1000 hPa
	2.1 Pienin säädettävä paine alle 0,5 hPa
	2.2 Tiiviys
3	Suorituskyky
	3.1 Paineen muutos 1 hPa:n askelin
	3.2 Säättöaika painepisteiden välillä alle 10 min.
	3.3 Toistettavuus alle 50 Pa
	3.4 Absoluuttinen tarkkuus 50 Pa
	3.5 Stabiilisuus instrumentin mittauksen aikana $\Delta P < 2 \text{ Pa/min.}$
4	Etäkäytettävyys
	4.1 Paineen asetus etäyhtäyden kautta
	4.2 Signaalin lähetys, kun asetettu paine saavutettu
5	Paineinstrumenttien testien paineensäädön suoritus
6	Luotettavuus
7	Hinta

## 3.2 Vaihtoehtojen selvitys ja aineiston keräys

Kaupallisia paineensäätimiä on tarjolla suuri määrä. Tarjontaan tutustuttiin eri valmistajien tuotekatalogien, verkkosivujen ja henkilökohtaisten yhteydenottojen avulla. Osa valmistajista oli ennalta tunnettuja tyhjiölaitteiden valmistaja, osa aiemmin tuntemattomia. Myös Mittatekniikan keskuksessa vieraillessa saatiin tietoa tunnetuista valmistajista. Seuraavien valmistajien tarjontaan tutustuttiin verkkosivujen ja muun saatavilla olevan materiaalin avulla: DHI (nykyään Fluke-yhtiön omistuksessa), Ruska (nykyään Fluke-yhtiön omistuksessa), Mensor, Beamex, Pfeiffer Vacuum, MDC, MKS, Apex, Vacuubrand, Oerlikon Leybold Vacuum, Kurt J. Lesker, Druck (nykyään omistaja GE Measurement & Control solutions) ja Additel.

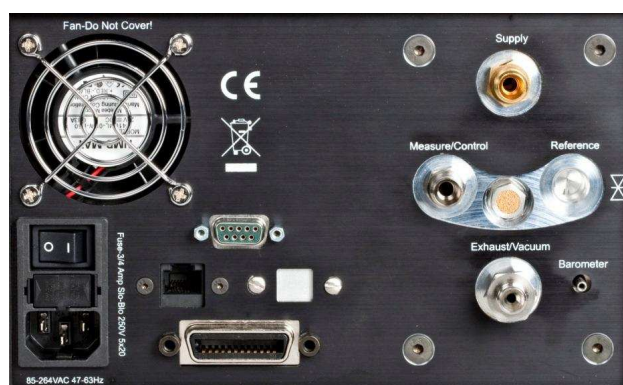
Osa paineensäätimistä oli massavirtaussäätäjiä (kappale 2.2.5), jotka eivät ole suoraan yhdistettävissä nykyiseen laitteistoon, vaan vaatisivat uudenlaisen säätöjärjestelmän kehityksen. Massavirtaussäätäjät suljettiin siis jatkotarkastelun ulkopuolelle. Tarkkuusvaatimus sulki myös suoraan pois osan säätimistä. Paineensäätimien soveltuvuus Mars-painealueelle oli haastavampi selvittää, sillä säädettäväksi painealueeksi ilmoitetaan usein esimerkiksi tyhjiöstä 50 bar:iin, jolloin pienin säädettävä paine jää epäselväksi. Tässä vaiheessa valmistajiin tai jälleenmyyjiin otettiin henkilökohtaisesti yhteyttä ja tiedusteltiin säätimen soveltuvuutta Mars-alueelle. Usein selvisi, että alin säädettävä paine on useita kilopascaleja, mutta paineensäätimistä kaksi täytti tämänkin kriteerin. Nämä säätimet olivat Beamexin valmistama POC6 ja GE Druck:n PACE-säädin. Molemmat sijoittuvat myös oikeaan hintaluokkaan. Seuraavaksi esitellään tarkemmin nämä kaksi säädintä.

### 3.3 POC6

POC6 on suomalaisen Beamexin valmistama automaattinen paineensäädin (kuvat 18). Paineensäädin pystyy generoimaan paineita -1...70 bar g riippuen valitusta painealueesta. Säätimen runkoon asennetaan kuhunkin tarkoitukseen parhaiten soveltuva paineanturi. Paineliitännät löytyvät säätimen takapaneelista (kuva 19): *Supply*-portti syöttöpaineelle, *Measure/Control*-portti säädettävään tilavuuteen ja *Exhaust/Vacuum*-portti tyhjiöpumpulle. *Reference*-portti on absoluuttimalleissa tulpattu. Gauge-malleissa siihen liitettäisiin vertailupaine. Lisäksi säätimessä on *Vent*-liitäntä tilavuuden ilmausta varten. [24]



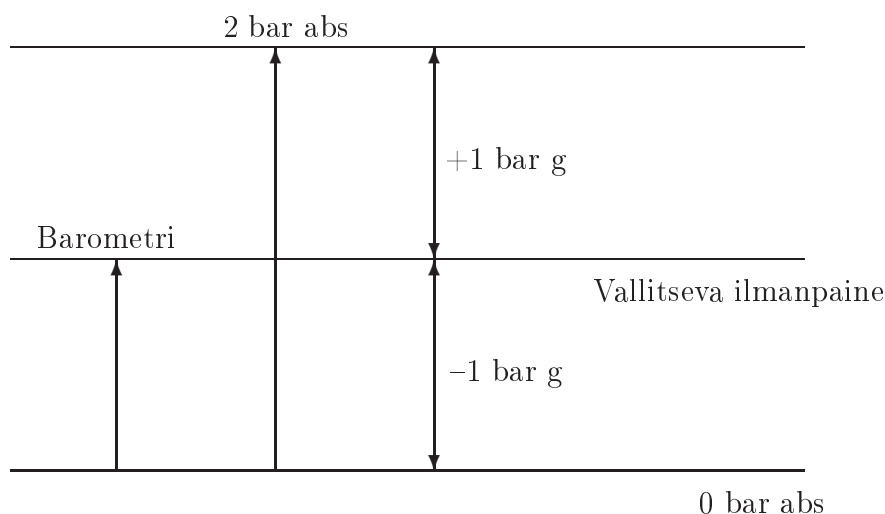
Kuva 18: POC6-paineensäädin. [24]



Kuva 19: POC6-säätimen takapaneeli. [24]

POC6-säätimeen voidaan asentaa myös barometri, joka mittaa vallitsevaa ilmanpainetta. Absoluuttipaineet säädin laskee mittaamalla yli- tai alipainetta sekä vallitsevaa ilmanpainetta kuvan 20 mukaisesti.

POC6-paineensäätimessä on kosketusnäyttö manuaalista ohjausta varten, sekä mahdollisuus etäkäyttöön RS-232 -portin kautta. POC6:n ilmoitetaan kykenevän säätämään 250 ml:n tilavuutta 0.025% tarkkuudella asetetusta painepisteestä alle 3 sekunnissa. Säädettävän testitilavuuden on määriteltävä olevan vain 0,05...1 litraa, joten säätö ei luultavasti tule olemaan yhtä nopeaa IL:n painelaitteistoon liitettynä



Kuva 20: POC6-paineensäätimen absoluuttisten paineiden mittauseriaate. Säätimen paineanturi mittaa yli- tai alipainetta ja säätimen barometri mittaa vallitsevaa ilmanpainetta. Laskemalla nämä paineet yhteen saadaan absoluuttinen paine.

tilavuuden ollessa huomattavasti suurempi. Pienimmäksi säädettäväksi paineeksi ilmoitetaan 0,025 psi eli noin 1,7 hPa, joka suurempi kuin säätimeltä vaadittava alin paine. Tämä on kuitenkin mahdollista kiertää esimerkiksi automaattisesti avattavalla ohitusventtiilillä, joka päästää kaasua painesysteemistä suoraan puskurikammioon. POC6-säätimen tekniset tiedot on kerätty taulukkoon 4. [24]

POC6-säätimellä on kolme eri toimintatilaa. Tilat valitaan kosketusnäytön painikkeilla. *Control- eli säätötilassa* säädin on aktiivinen ja ainoastaan ilmausliitännän venttiili on kiinni. Säätimen sisäinen konfiguraatio tässä tilassa on esitetty kuvassa 21. Säätötilassa paineensäädin avaa tai sulkee säätöventtiilejä päästämällä kaasua joko huoneenpaineesta tyhjiökammioon tai tyhjiökammioista puskurikammioon siten, että Measure/Control-portin paine saavuttaa asetetun paineen. Kun portin paine on käyttäjän asettamien rajojen sisällä, painelukema säätimen näytöllä muuttuu vihreäksi ilmoittaen asetetun paineen saavuttamisesta.

*Measure- eli mittaustilassa* kaikki venttiilit ovat kiinni ja sisäinen painemittari mittaa Measure/Control-portissa olevaa painetta, eli tyhjiökammion painetta. Paine ei säädetä, eikä aktiivisesti edes pidetä asetetussa arvossa. Tässä tilassa suoritettaisiin paineinstrumentin mittausta kalibraation aikana. Säätimen konfiguraatio mittaustilassa on esitetty kuvassa 22.

*Vent- eli ilmaustilassa* säädin avaa ilmausventtiilin siten, että korvausilma huoneenpaineesta pääsee virtaamaan systeemiin ja tilavuus palaa vallitsevaan ilmanpaineeseen. Ilmaustilaa ei testien aikana ole tarvetta käyttää muulloin kuin silloin, jos palataan takaisin vallitsevaan ilmanpaineeseen ja halutaan varmistua siitä, ettei painesysteemin jää paine-eroa. Ilmaustilassa voidaan tehdä myös sisäisen painemittarin

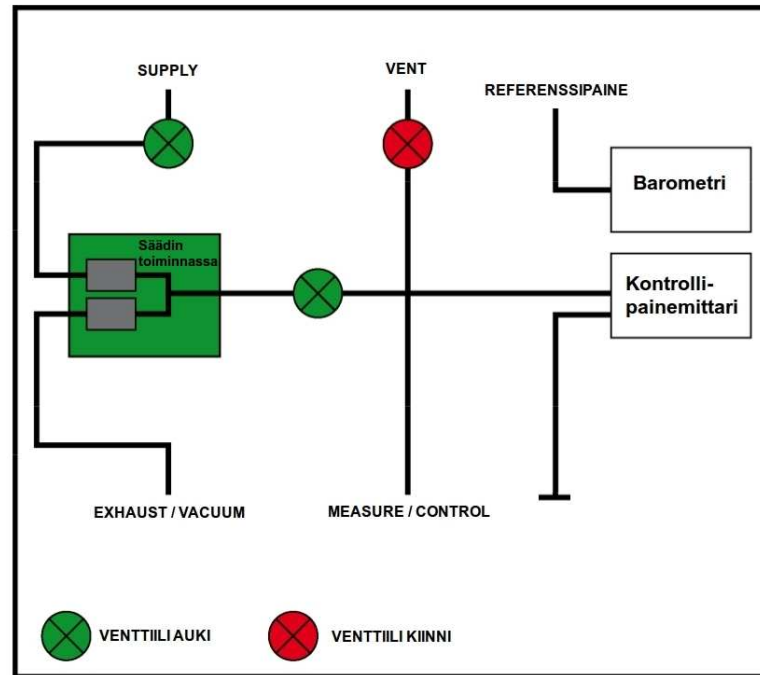
Taulukko 4: POC6-säätimen tekniset tiedot. [24]

Ominaisuus	POC6
Ulkomitat	133 x 213 x 305 mm
Paino	<9,1 kg
Painealue	-1 ... 70 bar g
Painemittaustyypit	Gauge- ja absoluuttipaine
Tarkkuus	<0,015% FS
Vuoden epävarmuus	<0,025% FS
Kompensoitu lämpötila-alue	15 ... 45 °C
Stabiilisuus	<0,004 % FS
Säätöalue	0 ... 100 % FS
Pienin säädettävä paine	1,7 hPa
Asetetun paineen ylitys	<1 % FS
Paineportit	7/16"- 20 F SAE sisältäen adapterit 1/4" ja 6 mm putkiliitintään
Suurin syöttöpaine	105 ... 110 % FS
Resoluutio	neljästä kuuteen numeroa
Mittaustaajuus	25 lukemaa/s
Lämpenemisaika	noin 15 min
Digitaalinen ulostulo	RS232, Ethernet, IEEE-488, USB (valinnainen)

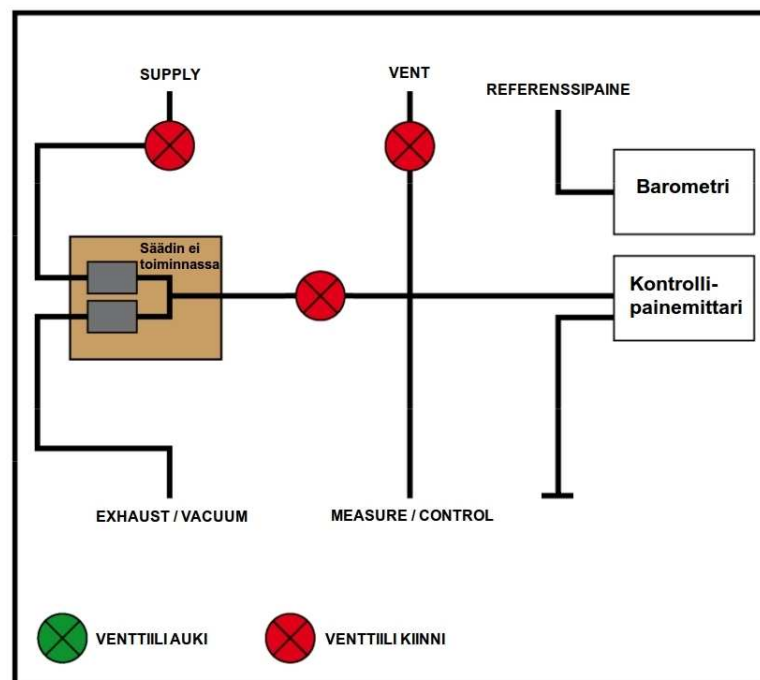
nollaus. [24]

POC6-paineensäädin haluttiin saada testattavaksi IL:n laboratorioon toiminnallisuuden ja suorituskyvyn varmistamiseksi. POC6 säädin saatiin hankittua valmistajalta testausta varten myyntikuntoisena, mutta ilman ostositoumusta. Painealueeksi valittiin -1...1 bar g eli sisäisen barometrin kanssa 0...2 bar absoluuttista painetta. Tälle painealueelle laskennallinen tarkkuus barometrin tarkkuus huomioituna on 0,32 hPa, mikä täyttää tarkkuusvaatimuksen. POC6-säätimelle suoritettut testit on kuvattu kappaleessa 4.1.

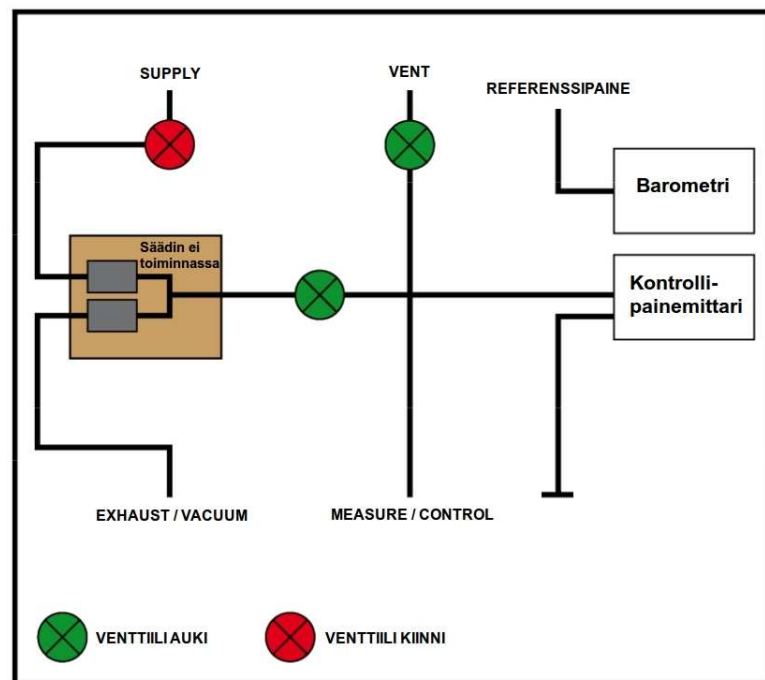




Kuva 21: POC6-säätimen konfiguraatio säätötilassa. Säätötilassa paineensäädin-  
sikkö on aktiivinen ja venttiili säädettävään tilavuuteen on auki. [24]



Kuva 22: POC6-säätimen konfiguraatio mittaustilassa. Kaikki venttiilit ovat kiinni  
ja sisäinen paineanturi mittaa Measure/Control-portin painetta. [24]



Kuva 23: Ilmaustilassa POC6 avaa ilmausventtiilin ja testitilavuuden paine palaa vallitsevaan ilmanpaineeseen. [24]

### 3.4 PACE 5000/6000

PACE on GE Druck:n valmistama modulaarinen paineensäädin (kuva 24). Säätimistä on kaksi eri mallia riippuen säätömoduulien määrästä. PACE 5000 sisältää yhden säätömoduulin ja PACE 6000 voi sisältää yhden tai kaksi säätömoduulia. PACE 6000 mahdollistaa siten joko yhden moduulin käytön, kahden moduulin yhtä-aikaisen käytön tai laajennetun painealueen. Laajennettu painealue on mahdollinen toteuttaa, jos molemmat säätömoduulit ovat alle 70 bar tai yli 70 bar moduuleja. PACE 6000 -mallin avulla olisi siis mahdollista säätää yhtä aikaa kahta erillistä painejärjestelmää yhden etäyhteyden kautta. Paineanturi on toimintaperiaatteeltaan pietsoresistiivinen anturi. [25]



Kuva 24: PACE-paineensäädin. Yläpuolella on 5000-malli ja alapuolella 6000-malli. [26]

Paineliitännät löytyvät säätimen takapaneelistä: *Supply+* -portti syöttöpaineelle, *Supply-* -portti tyhjiöpumpulle, *Outlet*-portti säädettävään tilavuuteen ja *Vent*-liitäntä tilavuuden ilmausta varten. *Ref*-portti on absoluuttimalleissa tulpattu. PACE:n paineliitännät näkyvät kuvassa 25.

PACE-paineensäätimessä on kosketusnäyttö manuaalista käyttöä varten, sekä mahdollisuus etäkäyttöön esimerkiksi RS-232 -portin tai USB:n kautta. Pienintä säädettävää absoluuttipainetta ei ole erikseen ilmoitettu. Myöskään säädettävää tilavuutta ei ole määritelty teknisissä tiedoissa. Muita teknisiä tietoja on kerätty taulukkoon 5.

Säätömoduuli valitaan vaadittavan tarkkuuden mukaan kolmesta eri vaihtoehdosta: CM0, CM1 tai CM2. Paras tarkkuus on CM2-moduulilla. Lisäksi moduuliin voidaan valita sisäinen barometri, jota tarvitaan absoluuttipaineiden mittaamiseen.



Kuva 25: PACE 5000-säätimen takapaneelin paineliitännät.

Taulukko 5: PACE-säätimen tekniset tiedot. [25]

Ominaisuus	PACE 5000 CM1-B
Ulkomitat	440 x 88 x 320 mm
Paino	5 kg runko + 5 kg säätömoduuli
Painealue	-1...210 bar g
Painemittaustyypit	Gauge- ja absoluuttipaine
Tarkkuus	0,01% Rgd + 0,01% FS + 0,05 mbar (barometri)
Vuoden epävarmuus	Riippuen säätömoduulista
Kalibroitu lämpötila-alue	15 ... 45 °C
Säädön stabiilisuus	0,003% FS
Säätöalue	0...100% FS
Paineliitäntä	G 1/8
Resoluutio	seitsemän numeroa
Mittausaajuus	8 lukemaa sekunnissa
Digitaalinen ulostulo	RS232, Ethernet, IEEE-488, USB

Absoluuttipaineet saadaan laskennallisesti samalla tavalla kuin POC6-säätimen tapauksessakin. Eri moduulivaihtoehtojen ilmoitetut tarkkuudet on esitetty taulukossa 6. Tarkkuudet sisältävät epälineaarisuuden, hystereesin, toistettavuuden ja lämpötilan vaikutuksen. Paras tarkkuus Mars-alueella saavutettaisiin CM2-moduulilla 1 bar g mittausalueella, jolloin tarkkuudeksi tulisi 8 Pa. Tämä on jo paljon alle vaaditun 50 pascalin. Vaadittuun tarkkuuteen päästäisiin myös CM0-moduulilla. Säätömoduuli on vaihdettavissa, jolloin painealuetta on mahdollista laajentaa käyttäen samaa runkoa. [25]

PACE-säätimellä on säätö- ja mittaus toimintatilat kuten POC6-säätimelläkin. Nämä tilat ovat valittavissa kosketusnäytön oletusnäkyvästä. Säätötilassa säädin on aktiivinen ja avaa tai sulkee säätöventtiilejä päästämällä kaasua joko huoneenpaineesta tyhjiökammioon tai tyhjiökammioista puskurikammioon. Kun Outlet-portin paine on käyttäjän asettamien rajojen sisällä, painelukema säätimen näytöllä muuttuu

Taulukko 6: Säättömoduulien tarkkuudet.

Parametri	CM0-B	CM1-B	CM2-B
Tarkkuus	0,02% Rdg + 0,02% FS	0,01% Rdg + 0,01% FS	0,005% Rdg + 0,005% FS
Säädön stabiilisuus	0,005% FS	0,003% FS	0,001% FS
Vuoden epävarmuus 1 bar g	0,02% Rdg	0,02% Rdg	0,02% Rdg
Vuoden epävarmuus 2...210 bar g	0,01% Rdg	0,01% Rdg	0,01% Rdg
Barometrin tarkkuus	0,10 mbar	0,05 mbar	0,025 mbar

vihreäksi ilmoittaen asetetun paineen saavuttamisesta. Säättötila voi olla aktiivinen tai passiivinen. Passiivisessa säättötilassa PACE siirtyy mittaustilaan automaattisesti, kun asetettu paine on saavutettu. Aktiivisessa tilassa säädin pysyy säättötilassa myös paineen saavutettuaan ja jatkaa aktiivisesti paineen pitämistä stabiilina. Mittaustilassa säätöventtiilit ovat kiinni ja sisäinen painemittari mittaa Outlet-portissa olevaa painetta. Ilmaustoiminto löytyy säätimen valikoista ja sen valinta avaa Ventportin venttiilin ja palauttaa painesysteemin huoneenpaineeseen.

Myös PACE haluttiin saada testattavaksi IL:n avaruuslaboratorioon säätimen toiminnan ja suorituskyvyn varmistamiseksi. Paineensäätimen jälleenmyyjä Amtele AB toimitti testausta varten IL:lle PACE 5000:n esittelymallin. Esittelymallissa säättömoduulina oli CM1-B, eli korkean tarkkuuden säättömoduuli, johon oli asennettu barometri. Säättömoduulin painealue oli -1...2 bar g eli 0...3 bar absoluuttipainetta. Säätimen tarkkuus tällä moduulilla on laskennallisesti 25 Pa Mars-alueella, mikä täyttää tarkkuusvaatimuksen. PACE-säätimen käyttötestit ja niiden tulokset on esitelty kappaleessa 4.2.

### 3.5 Testien suunnittelu

Paineensäätimelle tehtävien käyttötestien tarkoitus oli testata, täyttääkö säädin myös IL:n painesysteemin liitettynä sille asetetut vaatimukset ja onko säätimellä mahdollista saada aikaan paineinstrumenttien testeissä tarvittavat olosuhteet. Valitut paineensäätimet täyttävät vaatimukset teknisten tietojen mukaan, mutta on tärkeää testata toiminta todellisessa käyttöympäristössä IL:n painelaitteiston kanssa. Syynä tähän on ennen kaikkea säädettävän tilavuuden suuruus ja erikoinen painealue.

Käyttötesteissä käydään läpi uuden säätimen vaatimustaulukon (taulukko 3 sivulla 28) kohdat 2–6. Kohta 5 *Paineinstrumenttien testien paineensäädön suoritus* sisältää taulukossa 7 luetellut testit.

Taulukko 7: Käyttötesteissä suoritettavat testit ja niiden painepisteet tai -alueet. [7]

Instrumentin testi	Painepisteet tai painealue
5.1 Tarkastustesti	0(<0,5), 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 hPa
5.2 Kalibraatio	0(<0,5), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 hPa
5.3 Korkean painealueen kalibraatio	0(<0,5), 8, 20, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 hPa, vallitseva ilmanpaine
5.4 Painepepyhkäisy	13...3,5 hPa
5.5 Suurtyhjiömittaus	$< 10^{-3}$ hPa
5.6 Aikavakiotesti	Mars-alue, paineen muutos 4...20 Pa ajassa $< 2$ s.

Käyttötestit on suunniteltu viimeisimmän rakennetun paineinstrumentin, REMS-P:n, testivaatimusten mukaan. Nämä testit perustuvat siis suoraan paineinstrumenteille tehtäviin testeihin ja kalibrointiin, joten vähintään samat testit tullaan suoritamaan paineinstrumenteille myös tulevaisuudessa. Uuden säätimen on pystyttävä luomaan vaatimusten mukaiset paineolosuhteet, mutta varsinainen paineinstrumentti ei kuulu testikokoonpanoon. Paineinstrumenttien testeihin liittyy myös lämpötilan säätö, mutta se jätetään paineensäätimen käyttötesteistä pois. Osa taulukossa 7 luetelluista testeistä suoritetaan manuaalisesti ja osa automaattisesti etäyhteyden kautta. Testien suoritusjärjestyksellä ei ole säätimen testeissä merkitystä. Käyttötestien kulku voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. Laitteen asennus ja painesysteemin kokoaminen
2. Kaasunpoisto (*engl. outgassing*)
3. Tiiviystesti
4. Manuaalinen testaus
5. Etäkäytön testaus
6. Automaattiset mittausohjelmat

### 3.5.1 Kaasunpoisto

Kaasunpoisto suoritetaan aina ennen mittauksen aloittamista, jos painelaitteiston kokoonpanoa on muutettu tai purettu. Tämä toimenpide on hyvä tehdä myös, jos testien välillä on palattu huoneenpaineeseen. Kaasunpoisto tehdään vallitsevassa lämpötilassa, mutta se voidaan tehdä myös sääkaappi asetettuna korkeampaan lämpötilaan, jolloin kosteuden irtoaminen mittauskammion seinämistä on nopeampaa. Painesäätimen testeissä kaasunpoisto suoritetaan aivan ensimmäisenä ja sen jälkeen systeemin purkua vältetään. Suoritusohjeet [7]:

1. Käynnistä tyhjiöpumppu.
2. Aseta säädin säätämään kohti alinta mahdollista painetta, yleensä 0 hPa.
3. Odota, kunnes  $P < 50$  Pa.
4. Odota vähintään 1 tunti.

### 3.5.2 Tiiviystesti

Tiiviystesti suoritetaan ennen mittauksia, jos painepurkki on avattu edellisen testin jälkeen. Tällä testillä varmistetaan, että systeemi on alipainetiivis. Lisäksi suoritetaan suurtyhjiön tiiviystesti, mikäli testeissä otetaan mittauksia suurtyhjiössä ja tiiviystestiä ei ole tehty painepurkin avaamisen jälkeen. Tiiviystesti tehdään aina samassa paineessa, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tiiviystesti on hyvä myös toistaa kylmimmässä lämpötilassa mitä testeissä aiotaan käyttää, sillä jotkut tiivisteet saattavat alkaa vuotamaan matalissa lämpötiloissa. Paineensäätimen testeissä tiiviystesti tehdään ennen varsinaisia testejä kaasunpoiston jälkeen. Suoritusohjeet [7]:

1. Aseta paineeksi 2 hPa ja säädin säätötilaan.
2. Odota, kunnes paine on saavuttanut  $2 \text{ hPa} \pm 0,1 \text{ hPa}$ .
3. Aseta säädin mittaustilaan, jolloin venttiili mittaustilavuuteen on suljettuna. Jos paine alkaa nousta, tyhjiökammio tai joku muu systeemin osa vuotaa.
4. Odota, että paine nousee 0,05 hPa, tai on kulunut 5 minuuttia. Merkitse ylös kauanko paineen nousu kesti.
5. Testi on läpi, jos paineen nousu 0,05 hPa kesti kauemmin kuin 4 minuuttia.
6. Jos testeissä käytetään suurtyhjiötä, jatka tiiviystestiä ohjeiden mukaan.
7. Käynnistä Combitron-tyhjiömittari.
8. Aseta paineeksi 0 hPa ja säädin säätötilaan.
9. Odota kunnes paine on  $< 1,0$  hPa ja avaa manuaalinen ohitusventtiili.
10. Kun paine on tasaantunut, käynnistä turbopumppu.

11. Odota 30 minuuttia.
12. Kirjaa ylös Combitron-mittarin lukema. Jos lukema on  $<10^{-3}$  hPa, testi on läpi.

### 3.5.3 Manuaalinen testaus

Manuaalisella testauksella tarkoitetaan laitteen kosketusnäytön kautta tapahtuvaa testausta, eli ei etäkäyttöä. Näissä testeissä tutustutaan laitteen toimintaan ja ominaisuuksiin, sekä etsitään oikeat säädöt ja asetukset. Näihin testeihin ei ole yksityiskohtaisia ohjeita, koska vaadittavat toimenpiteet riippuvat säätimestä ja sen käyttäytymisestä. Ainakin seuraavat ominaisuudet selvitetään: alin säädettävä paine, säätöaika alle 0,5 hPa tyhjiöön sekä suurtyhjiöön, säädön nopeus, toistettavuus ja tarkkuus. Lisäksi manuaalisesti suoritetaan aikavakiotesti ja suurtyhjiömittaus. Aikavakiotestissä painesysteemiin generoidaan nopea, alle 2 sekuntia kestävä, suuruudeltaan 4...20 Pa paineen muutos Mars-alueella. Tämä testi on vanhalla järjestelmällä suoritettu manuaalisesti, eikä automaattista suoritusta vaadita uudeltakaan säätimeltä. Käytännössä aikavakiotesti vaatii venttiilien ohjausta manuaalisesti, jotta sopivan suuruinen paineen muutos saadaan synnytettyä. Suurtyhjiömittaus paineinstrumentille suoritetaan nimensä mukaisesti suurtyhjiössä, jossa instrumenttia mitataan määrätty aika. Suurtyhjiömittausta ei suoriteta automaattisesti, sillä suurtyhjiöön ei päästä ilman manuaaliventtiilin avausta ja turbopumpun käynnistämistä, joita toistaikseksi ei voida tehdä automaattisesti. Ohjeet suurtyhjiöön pääsyyn on annettu tiivistestien ohjeiden yhteydessä edellisessä kappaleessa.

### 3.5.4 Etäkäytön testaus

Yksi vaatimus uudelle paineensäätimelle on se, että sitä pystytään ohjaamaan etäyhteydellä mittautietokoneen kautta, esimerkiksi sarjaporttia tai USB-liitäntää käyttäen. Etäkäytön testaustoimenpiteet riippuvat laitteesta ja liitännästä, mutta tarkoituksena on tutustua etäkäyttöön ja testata sen toiminta. Säätimelle on pystyttävä asettamaan säädettävä paine ja säätimen on pystyttävä lähettämään viesti siitä, että paine on saavutettu etäyhteyden kautta. Tämä testivaihe on valmistautumista seuraavaan vaiheeseen, jossa säädintä on pystyttävä käyttämään mittautietokoneen kautta automaattisesti.

### 3.5.5 Automaattiset mittausohjelmat

Automaattisten mittausohjelmien tarkoitus on mahdollistaa pitkät mittaussarjat siten, että käyttäjän ei tarvitse olla paikalla. Automaattiset mittausohjelmat suoritetaan paineensäädön suhteen samalla tavalla, kuin paineinstrumenttien testeissä, mutta ilman mitattavaa instrumenttia. Painesysteemin painetta seurataan referenssipainemittarilla PTB201 tai PTU200 painealueesta riippuen. Automaattisesti tehtäviin testeihin kuuluvat tarkastustesti, kalibraatio ja korkean painealueen kalibraatio. Kalibraatioon kuuluu painepisteiden mittauksen lisäksi painepyyhkäisy, eli tasisesti muuttuva paine, sekä suurtyhjiömittaus. Paine pisteet mitataan sekä ylös-



että alaspäin painetta muuttaen. Varsinaisissa paineinstrumenttien testeissä painepisteet mitataan myös useassa eri lämpötilassa. Testit ovat tästä johtuen pitkäkestoisia ja vaatisivat jatkuvaa paineen tai lämpötilan säätämistä käsin, jos testejä ei olisi mahdollista automatisoida. Instrumenttien testeissä mittausohjelmilla ohjataan sekä painesysteemiä ja instrumenttien mittausta että sääkaappia. Näissä painesäätimen testeissä ohjataan automaattisesti ainoastaan paineensäädintä. Kaikissa automaattisesti tehtävissä testeissä tyhjiöpumppu on jatkuvasti päällä, turbopumppu ei ole päällä ja manuaaliventtiili on suljettuna.

Tarkastustesti, kalibraatio ja korkean painealueen kalibraatio suoritetaan hyvin pitkälti samalla tavalla. Testejä varten kirjoitetaan mittausohjelma, joka asettaa säädettävän painepisteen yksi kerrallaan. Säätimen tulee pystyä ilmoittamaan, milloin asetettu paine on saavutettu. Kun tavoitepaine on saavutettu, säädin asetetaan sulkemaan venttiilit siten että paine pysyy painepurkissa stabiilina ja odotetaan yhden minuutin ajan. Tämä vaihe jäljittelee instrumentin mittausta. Mittauksen onnistumiselle ehtona on se, että painepiste on pysynyt stabiilina ( $\Delta P < 2 \text{ Pa/min}$ ) mittauksen aikana ja paineen tarkkuus on 50 Pa, paitsi korkean painealueen kalibraatiossa 10 hPa. Testi aloitetaan yleensä matalimmasta paineesta, josta siirrytään askelittain paineessa ylöspäin. Korkeimmasta paineesta siirrytään taas askelittain paineessa alaspäin. Vanhalla paineensäätöjärjestelmällä siirtymät painepisteestä toiseen Mars-alueella kestävät keskimäärin 4,3 minuuttia. Matalimmat painepisteet saavutetaan hitaimmin, sillä paine-ero puskurikammion ja painejärjestelmän välillä on pienin. Tarkastustesti 2...14 hPa vain yhteen suuntaan 5 minuutin mittauksilla kestää noin 85 minuuttia ja kalibraatio 1 hPa:n välein yhteen suuntaan kestää noin 130 minuuttia. Nämä ovat suuntaa-antavia lukemia, eivät vaatimuksia uudelle paineensäätimelle. [7]

Paineppyhkäisy 13 hPa:sta 3,5 hPa:iin tehdään siten, että paine muuttuu tasaisesti 0,2 hPa/min. Paineinstrumenttien testeissä instrumenttia mitataan koko paineen muutoksen ajan. [7]

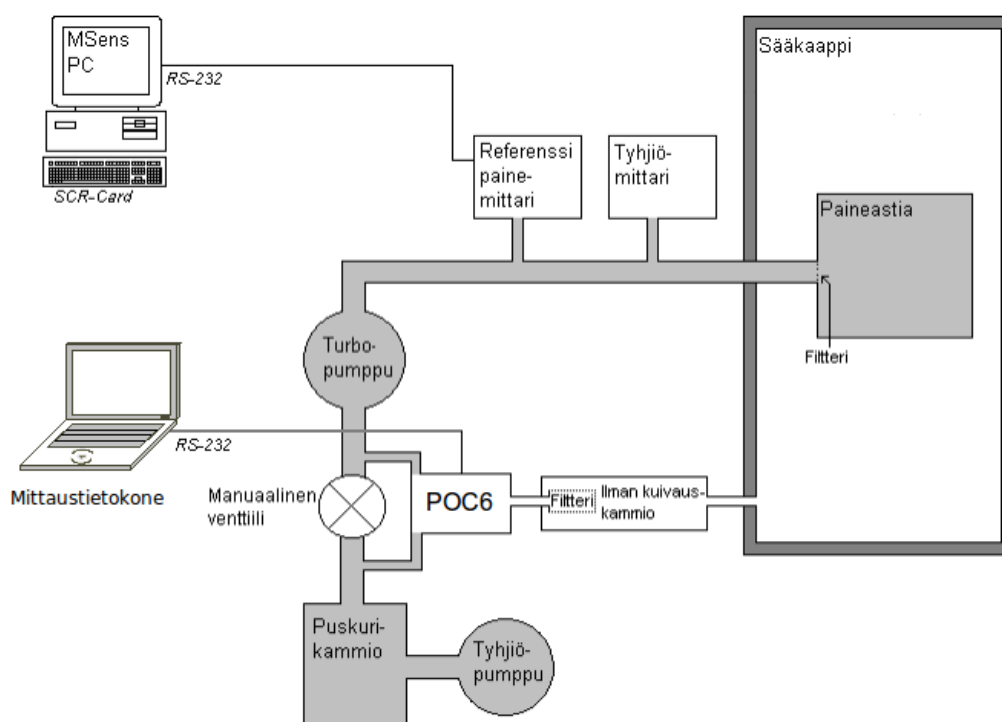
Automaattiset mittausohjelmat päätettiin kirjoittaa Tcl-ohjelmointikielellä, sillä myös uusi MSens on kirjoitettu Tcl:llä. Näin testien aikana kirjoitettuja ohjelmia voi olla mahdollista hyödyntää suoraan myös tulevaisuudessa sisällyttämällä ne MSens-ohjelmaan.

## 4 Käyttötestit

### 4.1 Beamex POC6

#### 4.1.1 Asennus ja käyttöönotto

POC6-säädin toimitettiin käyttötestejä varten Ilmatieteen laitoksen avaruuslaboratorioon 14.6.2012. POC6-säätimeen oli asennettu paineanturi, jonka mittausalue oli -1...1 bar g eli 0...2 bar absoluuttista painetta. Laitteen asennuksen suoritti Beamexin kouluttaja Jari Kiili. Asennuksessa noudatettiin käyttöohjeiden asennusohjeita. Ohjeista poikettiin ainoastaan siinä, että paineen syöttöporttiin (Supply-portti) ei kytketty 110% FS (*Full Scale*) ylipainetta, koska suurin testeissä tarvittava paine on vallitseva huoneenpaine. Laboratorion testilaitteiston kokoonpano oli kuvan 26 mukainen, mittaustietokoneena toimi MSens-koneen lisäksi kannettava Dell-tietokone. MSens-konetta käytettiin referenssipainemittarien lukemiseen ja Dell-tietokonetta paineensäätimen ohjaamiseen ja datan tallentamiseen. Liitännät IL:n laboratorion painesysteemiin toteutettiin säätimen päässä putkiliittimillä, joista putket johdettiin DN16KF-laippoihin. Laipat yhdistettiin samoihin portteihin kuin missä vanha paineensäätösystemi sijaitsi aiemmin. Korvausilmaliitäntään huoneilmaan liitettiin kuivatuskammio ja suodatin, jotka olivat käytössä myös vanhassa systemissä. Säädin oli käynnistysvalmis heti systeemiin liittämisen jälkeen.



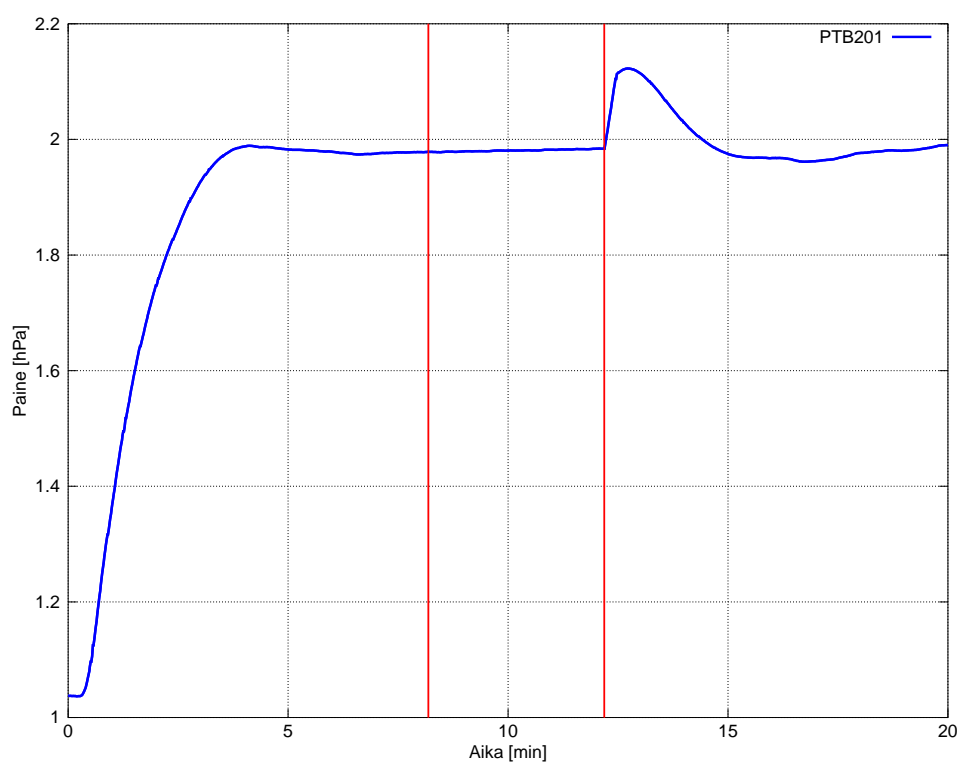
Kuva 26: Painekalibrointilaitteiston kokoonpano POC6-säätimen testien aikana. Venttilisysteemi on korvattu POC6-säätimellä, jota voidaan ohjata kannettavan tietokoneen kautta. Referenssipainemittarin lukemiseen käytetään vanhaa MSensiä.

Säädin suorittaa käynnistyksen yhteydessä sisäisen järjestelmänsä tarkastuksen ja alustuksen, joka kestää noin 40 sekuntia. Lämpenemisajaksi ilmoitetaan 15 minuuttia.

Ensimmäinen nopea testi suoritettiin yhdessä kouluttaja Jari Kiilin kanssa. Tarkoituksena oli varmistaa, että säädin pääsee 2 hPa:iin asti. Huolimatta siitä, että säädettävä tilavuus oli paljon suositeltua suurempi, päästiin kahteen hehtopascalesiin alle puolessa tunnissa. Ennen ensimmäisiä varsinaisia testejä säädin asetettiin säätämään 0 hPa:iin kaasunpoistoa varten ja kun 1 hPa oli saavutettu, avattiin manuaaliventtiili ja käynnistettiin turbopumppu.

#### 4.1.2 Tiiviystesti

Tiiviystesti suoritettiin 18.6.2012 testin ohjeiden mukaisesti. Lähtötilanteessa oltiin suurtyhjiössä turbopumppu sammutettuna ja manuaaliventtiili kiinni. Paine nostettiin 2 hPa:iin säätimen säätötilassa. Säätimen asettama paine oli referenssipainemittari PTB201:stä tarkastettuna hyvin lähellä oikeaa, 1,98 hPa. Paineen tasaannuttua säädin asetettiin mittaustilaan, jolloin POC6-säädin sulkee säätöventtiilit. Tila pidettiin päällä 5 minuuttia, jonka jälkeen vaihdettiin takaisin säätötilaan. Kuvassa 27 näkyy PTB201:stä tallennettu paine ajan funktiona tiiviystestin aikana. Mittaustilassa oltu ajanjakso on merkitty kuvaan punaisilla pystyviivoilla. Mittaustilasta takaisin säätötilaan siirryttäessä systeemin paine tekee pienen, noin 0,1 hPa:n hyppäyksen ylöspäin, mutta asettuu pian takaisin 2 hPa:iin. PTB201:n painedatista laskettiin paine-ero alku- ja loppuhetkien välillä ja eroksi saatiin 0,007 hPa. Tämä täyttää vaatimukset sekä tiiviydelle ( $<0,05$  hPa/4 min), että stabiiliudelle mittauksen aikana ( $<0,02$  hPa/min). Suurtyhjiön tiiviystesti suoritettiin myöhemmin, 9.7.2012, käyttäen Combitron-mittaria tyhjiön hyvyyden arvioimiseen. Myös suurtyhjiön tiiviystesti läpäistiin onnistuneesti.



Kuva 27: Tiivistestien aikana logattu data PTB201 Specialista. Tiivistestien alku- ja loppuhetket on merkitty kuvaajaan punaisilla pystyviivoilla.

### 4.1.3 Manuaalinen käyttö

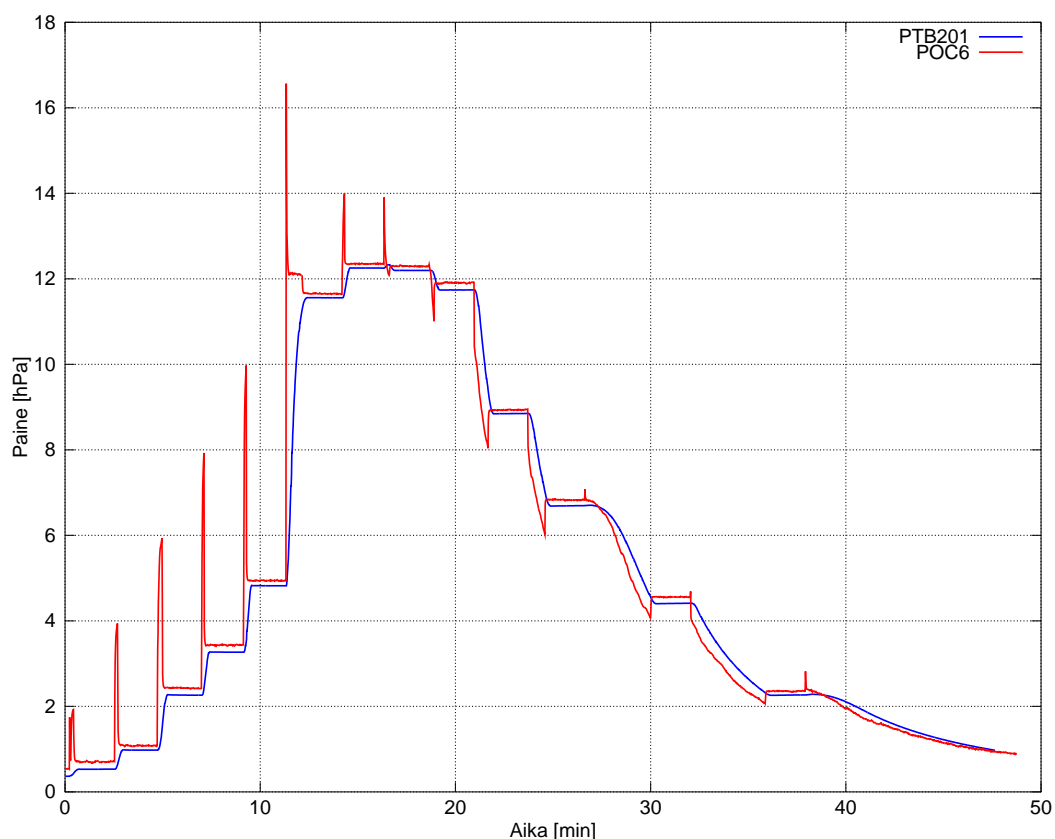
Manuaalisesti, eli laitteen kosketusnäytön kautta, säädintä ohjaamalla pyrittiin tutustumaan laitteen ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. Testaus aloitettiin tiiviys-testin jälkeen Mars-alueesta, sillä se on toiminnan kannalta ehdottomasti tärkein ja myös haastavin painealue. Ensimmäiseksi pyrittiin suorittamaan tarkastustesti, eli portaittainen paineen muutos 2 hPa:sta 14 hPa:iin ja takaisin 2 hPa:n askelmin. Jokaisessa painepisteessä säädin asetettiin mittaustilaan jäljittelemään paineinstrumentin mittausta. Systeemin painetta seurattiin POC6:n näytön lisäksi Vaisala PTB201:n avulla.

POC6-säätimellä tämä testi suoritettiin siten, että painepisteen asetuksen jälkeen säädin asetettiin säätötilaan. Kun säätötilan painelukema muuttui vihreäksi, eli paine oli asetettujen rajojen sisäpuolella, säädin asetettiin mittaustilaan. Tämä toistettiin jokaisen painepisteen kohdalla. Raja paineen stabiilisuudelle asetettiin mahdollisimman tiukaksi,  $\pm 0,004\%$  FS eli 0,04 hPa.

Hyvin pian selvisi, että POC6-säätimen säätötilassa näyttämä paine ei vastaa säädettävän tilavuuden todellista painetta. Tämä nähtiin vertaamalla referenssipainemittari PTB201:n painelukemaa säätötilan näyttämään. Säätötilassa painelukema muuttuu nopeammin kuin todellinen paine painejärjestelmän sisällä ja vaikka näyttö antaisi ymmärtää että asetettu paine on saavutettu, todellinen paine saattaa olla paljon jäljessä. Mittaustilassa sen sijaan painelukema on hyvin lähellä PTB201:n lukemaa. Selitys tähän käyttäytymiseen on todennäköisesti se, että säätötilassa POC6:n painelukema on laskennallinen, perustuen oletettuun tilavuuteen ja venttiilien asentoon. Kokonaistilavuus IL:n painesysteemissä on huomattavasti suurempi kuin mihin POC6 on tarkoitettu, kuten aiemmin on todettu, joten se selittää säätötilan lukeman eron todelliseen paineeseen.

Tilanne näkyy hyvin myöhemmin tehdyissä kuvissa, joissa on esitetty sekä POC6:n että PTB201:n painelukemat. Paineet tallennettiin sekunnin välein tietokoneelle sarjaporttiliitännän kautta. Kuvan 28 tilanteessa POC6-säädin asetettiin mittaustilaan heti näytön painelukeman muuttuessa vihreäksi, eli kun paineen pitäisi olla asetettujen rajojen sisäpuolella. Kahden minuutin jälkeen asetettiin seuraava painepiste ja siirryttiin taas säätötilaan. Kuvasta nähdään, että systeemin paine (sininen käyrä) ei ehdi nousta asetettuun tavoitepaineeseen ennen kuin POC6 ilmoittaa jo painepisteen olevan stabiili (punainen käyrä). Painetta alaspäin säädettäessä tilanne on sama, mutta paine on päinvastoin asetettua suurempi. POC6:n paineen kuvaajan piikit syntyivät kun säätötilasta siirryttiin mittaustilaan. Paine pisteen 12 hPa aikana POC6-säätimen lukema hyppää jopa 16,5 hPa:iin, mutta palaa pian 12 hPa:iin. Mittauksen alkaessa mittaustilan lukema kuitenkin on vain 11,6 hPa. POC6:n kuvaajasta näkyy myös selvästi, että siirtymät kohti pienempää painetta ovat selvästi hitaampia kuin paineessa ylöspäin. Tämän testin aikana paine järjestelmässä ei siis saavuttanut asetettuja painepisteitä vaan jäi joko ylä- tai alapuolelle.

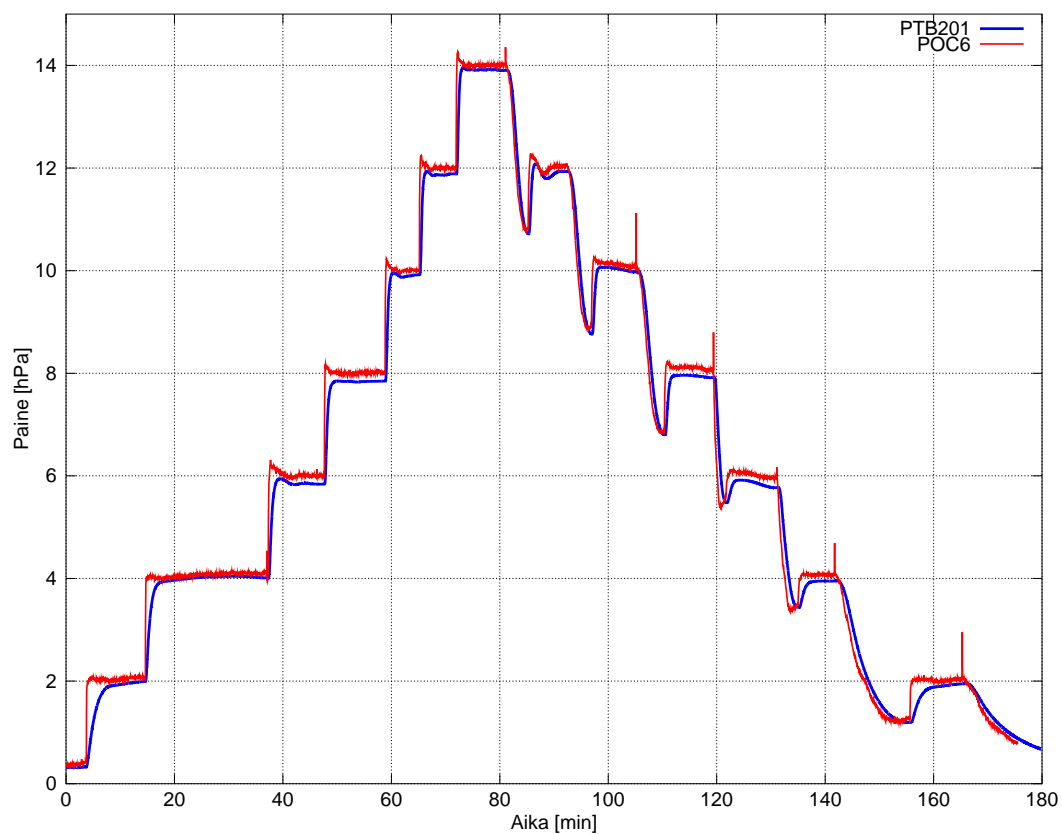
Seuraavassa testissä jokainen paineen muutos tehtiin niin hitaasti, että systeemin todellinen paine ehti saavuttaa asetetun paineen ja paine oli stabiloitunut. Vastan jälkeen säädin asetettiin mittaustilaan minuutin ajaksi. Kuvassa 29 on esitetty tämänkaltaisen testin aikana tallennettu data. Pienempiä paineita kohti säätäessä



Kuva 28: POC6:n ja PTB201:n painedata manuaalisen tarkastustestin aikana. POC6-säädin asetettiin mittaustilaan heti näytön ilmoitettua, että painepiste on saavutettu. POC6-kuvaajan piikit syntyvät tästä tilanmuutoksesta.

käydään välillä jopa 1 hPa:n verran asetetun pisteen alapuolella, mutta se ei ole haitallista. Tästä testistä saatiin säätöajat eri painepisteiden välillä, mukaan lukien stabiloitumisajan. Keskimäärin paineen muutos kesti 12,7 minuuttia. Säätöajat on esitetty taulukossa 8. Painepiste 0 hPa tarkoittaa painetta alle 0,5 hPa. Säätöajat eivät olleet jokaisella testikerralla samansuuruiset, vaan vaihtelivat useita minutteja eri testien välillä. Paineensäätö alaspäin kohti tyhjiötä on hitaampaa kuin ylöspäin kohti huoneenpainetta johtuen pienemmästä paine-erosta painesysteemin ja tyhjiöpumpun pumppaaman puskurikammion välillä.

Manuaalisten testien aikana mitattiin myös säätöaika alle 0,5 hPa tyhjiöön ja suurtyhjiöön. Suurtyhjiöön päästiin 30 minuutissa, kun manuaaliventtiili avattiin ja turbopumppu käynnistettiin paineen saavuttaessa 1 hPa:n. Tällä osoitettiin, että suurtyhjiömittaus on suoritettavissa, eikä suurtyhjiöön pääsy kestä kohtuuttoman pitkään. Huoneenpaineesta alle 0,5 hPa:iin pääsy kesti noin tunnin ilman manuaaliventtiilin avausta. Säädön ollessa päällä 24 tuntia kohti pienintä mahdollista painetta, eli 0 hPa, saavutettiin 0,28 hPa.



Kuva 29: POC6:n ja PTB201:n painedata manuaalisen tarkastustestin aikana. Tässä testissä POC6-säädin asetettiin mittaustilaan vasta kun PTB201:n lukemasta oli varmistettu, että painepiste on saavutettu.

Taulukko 8: Siirtymäajat painepisteiden välillä POC6-säätimellä.

Siirtymä [hPa]	Aika [min]
0 – 2	13
2 – 4	21
4 – 6	10
6 – 8	8
8 – 10	5
10 – 12	6
12 – 14	8
14 – 12	10
12 – 10	12
10 – 8	13
8 – 6	11
6 – 4	10
4 – 2	21
2 – 0	23

Säätötilan painelukeman poikkeamaa todelliseen paineeseen nähden pyrittiin myöhemmin korjaamaan yhteistyössä valmistajan kanssa. Tavoitteena oli saada säätötilan painelukema vastaamaan paremmin todellista painetta, jotta säätimen ilmoitus painepisteen saavuttamisesta pitäisi paikkansa. Ratkaisuksi valmistajalta tuli ehdotus poistoilman venttiilin (Exhaust-liitännässä) kiristys säätimen asetuksista. Tätä asetusta ei ole tarkoitus muuttaa käyttäjän toimesta, mutta siihen oli mahdollista päästä käsiksi salasanan avulla. Ennen ja jälkeen kiristyksen suoritettiin kahteen kertaan testi, jossa asetettiin painepisteet 2...8 hPa, odotettiin ilmoitus painepisteen saavuttamisesta, asetettiin säädin mittaustilaan ja tallennettiin säätimen painelukema. Tulokset on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Jos poistovenktiilin kiristys on auttanut ongelmaan, jälkimmäisissä mittauksissa mitattujen paineiden pitäisi olla lähempänä asetettua painetta.

Taulukko 9: Mittaustilassa mitatut paineet ennen poistovenktiilin kiristystä.

Painepiste [hPa]	Mittaus 1 [hPa]	Mittaus 2 [hPa]
2	0,79	0,53
4	2,26	2,85
6	4,61	5,42
8	7,55	7,71

Ennen poistovenktiilin kiristystä tallennetut painelukemat poikkesivat asetetusta



Taulukko 10: Mittaustilassa mitatut paineet poistiventtiilin kiristuksen jälkeen.

Painepiste [hPa]	Mittaus 1 [hPa]	Mittaus 2 [hPa]
2	0,56	0,70
4	3,99	2,16
6	5,52	5,55
8	7,67	7,57

paineesta keskimäärin 1,04 hPa ja kiristuksen jälkeen 0,79 hPa. Tällä toimenpiteellä saattoi siis olla pieni vaikutus, mutta ero ei ole merkittävä eikä ongelmasta päästy eroon. Venttiiliä ei ollut mahdollista kiristää enempää.

Manuaalisesti suoritettiin myös aikavakiotesti. Aikavakiotestissä tarvittava hyvin nopea, alle 2 sekuntia kestävä paineen muutos olisi helpoin saada aikaan suoraan säätöventtiilejä manipuloimalla. Se ei kuitenkaan ollut mahdollista POC6-säätimessä, mikä on ymmärrettävää kun kyseessä on kaupallinen säädin. Nopeaa paineen muutosta lähdettiin hakemaan manuaalisesti säädintä ohjaamalla. Testi suoritettiin 5.9.2012 Mars-paineessa ja referenssipainemittarina toimi PTB201. Säätötilassa asetetun paineen muuttaminen 8,0 hPa:sta 8,1 hPa:iin tuotti liian hitaan muutoksen. Ilmeisesti säätöventtiili avautuu tämänkaltaisessa pienessä muutoksessa vain hyvin vähän. Paremman tuloksen tuotti aloittamalla muutos mittaustilasta, jolloin säätötilaan vaihtaminen aiheuttaa nopean hyppäyksen. Tämä hyppäys on nähtävissä tiiviystestin kuvassa 27. Terävä paineen muutos suuruudeltaan 10 Pa saatiin aikaiseksi aloittamalla mittaustilasta, asettamalla paineeksi 8,05 hPa, asettamalla säädin säätötilaan ja välittömästi takaisin mittaustilaan. PTB201:n datan perusteella tämä hyppäys kesti kuitenkin 15 sekuntia. Myöhemmin selvisi, ettei PTB201 sovellu referenssiksi aikavakiotestiin sisäisen lukemien keskiarvoistuksen vuoksi. Aikavakiotestin tulos jäi siten lopulta epäselväksi.

#### 4.1.4 Etäkäytön testaus

Etäkäyttöä varten POC6-säädin yhdistettiin mittaustietokoneeseen sarjaportin kautta. Valmistajalta saatiin säätimen kommunikaatioprotokolla ja käytettävissä olevat komennot. Kommunikaatioprotokolla ja komennot eivät ole julkisia, joten tässä opinnäytetyössä komennot on muutettu. Komentoja testattaessa käytettiin alkuun GTKTerm-terminaaliohjelmaa, joka on yksinkertainen ohjelma sarjaporttikommunikaatiota varten. Ensimmäisten testien jälkeen komentojen lähettämiseen siirryttiin käyttämään Tcl-ohjelmointikielellä kirjoitettuja testiohjelmia. Sarjaportin kautta säätimelle lähetettiin komentoja, joiden avulla automaattiset mittaushjelmat tullaan rakentamaan: asetettiin tavoitepaine, kysyttiin painelukemaa ja toimintatilaa, asetettiin toimintatila ja kysyttiin onko paine asetetulla alueella. Kaikki testeissä käytetyt toiminnot on esitelty liitteessä A. Etäkäyttö onnistui odotetusti. Painelukemaa kysyttäessä säädin palauttaa näytölläkin näkyvän lukeman, joka säätötilassa on laskennallinen ja mittaustilassa todellinen paine. Tässä vaiheessa testattiin myös

säätimen painelukeman tallennus tiedostoon ja tallennetun datan avulla piirrettiin kappaleessa edellisessä kappaleessa esitetyt kuvaajat.

#### 4.1.5 Automaattiset mittausohjelmat

Automaattiset mittausohjelmat kirjoitettiin Tcl-ohjelmointikielellä ja ajettiin mitaustietokoneella. Mittausohjelmat kirjoitettiin siten, että testien aikana näytölle tulostetaan tietoa testin kulusta ja säätimen mittaamat painelukemat. Aiempien testien perusteella tiedettiin, että systeemin paine ei välttämättä ole saavuttanut asetettua painetta, vaikka POC6 ilmoittaisi niin. Kun todellinen paine halutaan lukea säätimestä, on säädin asetettava ensin mittaustilaan ja vasta sitten kysyttävä painelukema. Näistä lähtökohdista voitiin aloittaa mittausohjelmien suunnittelu ja automaattisten testien suoritus. Automaattiset mittaukset esitellään seuraavaksi aikajärjestyksessä.

#### Tarkastustesti

Ensimmäinen automaattinen testi oli tarkastustesti, sillä se on yksinkertaisin sisältäen pienimmän määrän painepisteitä. Testin lähtötilanteessa systeemin paine oli alle 2 hPa ja paineensäädin oli mittaustilassa. Referenssipainemittarina oli PTB201.

Tarkastustestiohjelman ensimmäisessä versiossa säätimelle asetettiin painepiste, asetettiin säädin säätötilaan ja odotettiin 5 minuuttia, jonka jälkeen kysyttiin, onko systeemin paine asetetulla alueella. Viiden minuutin odotusaika perustuu kuvaajaan 29, josta arvioitiin, että suurin osa painepisteistä on saavutettu alle 5 minuutissa. Jos paine ei ole alueella, kyselyä toistetaan kunnes ehto täyttyy. Sen jälkeen säädin asetettiin mittaustilaan ja odotettiin 2 minuuttia. Mittauksen jälkeen asetettiin seuraava painepiste samalla tavalla. Alin painepiste, 0,5 hPa, jätettiin aluksi pois. Muut paineet käytiin läpi sekä ylös- että alaspäin painetta muuttaen. Odotetusti mitatut paineet eivät olleet yhtä suuria kuin asetetut paineet. Tärkeämpi tulos tästä testistä oli kuitenkin säätimen odottamaton jumittuminen. Vaikutti siltä, että venttiili tyhjiöliitännässä jäi auki ja paine laski kohti tyhjiötä. Säädettyä painetta alaspäin 10 hPa:sta 8 hPa:iin paine jatkoi laskua pysähtymättä 8 hPa:n kohdalla. Tilanne korjaantui asettamalla tavoitepaine manuaalisesti uudelleen, mutta mittausohjelmaa ei saatu suoritettua loppuun.

Seuraavaan versioon tarkastustestin mittausohjelmasta tehtiin muutoksia edellisten tulosten perusteella. Kun säädin asetetaan mittaustilaan, paine luetaan säätimeltä ja sitä verrataan asetettuun paineeseen. Jos paine eroaa asetetusta paineesta korkeintaan  $\pm 0,1$  hPa, mittauksia jatketaan ja sen jälkeen siirrytään seuraavaan painepisteeseen. Jos paine eroaa asetetusta paineesta enemmän, asetetaan sama paine uudestaan ja jatketaan säätöä 3 minuuttia. Sen jälkeen toistetaan paineen tarkastus. Painelukeman tarkastus mittausohjelmassa asettaa myös ylärajan painepisteiden toistettavuudelle ja nyt tehdyllä ohjelmalla saavutetaan vähintään 0,2 hPa:n toistettavuus. Nämä muutokset eivät korjanneet säätimen jumittumista, jota alkoi esiintyä yhä useammin. Säätimen jumituessa ohjelma jää silmukkaan, jossa odotetaan, että paine on asetetuissa rajoissa. Jumittumiselle ei edelleenkään löytynyt

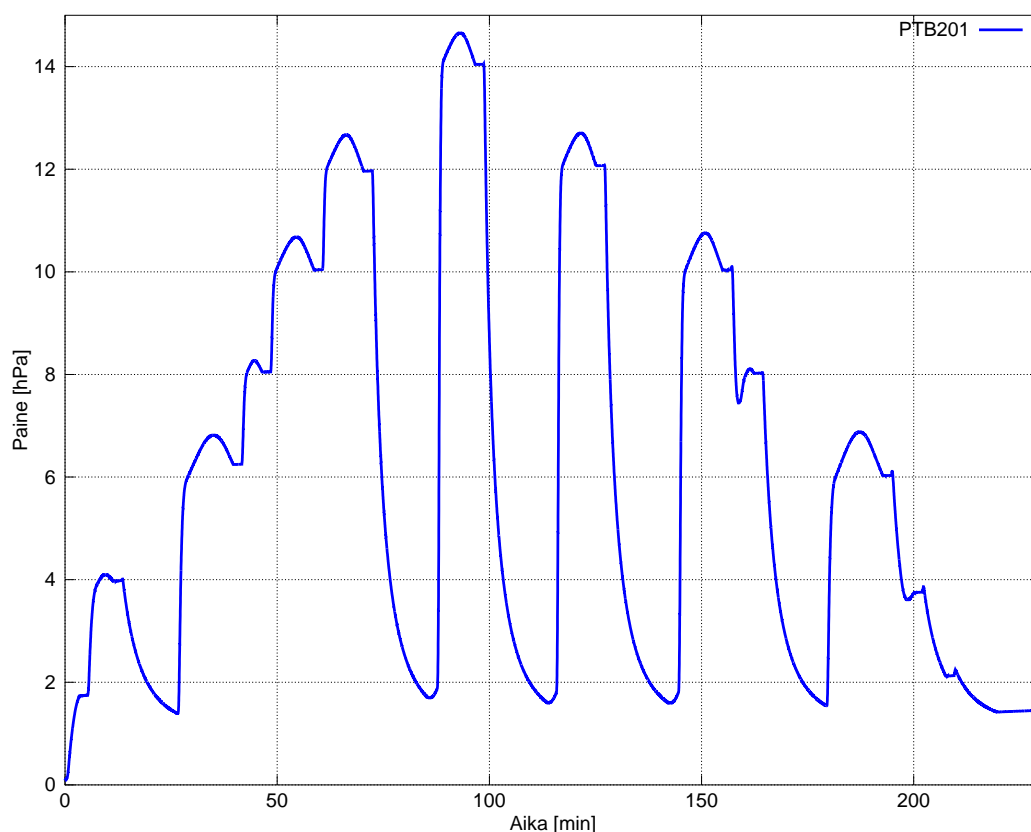
selvää syytä, joten asiasta oltiin yhteydessä laitteen valmistajaan. Testejä päätettiin silti jatkaa.

Seuraava korjaus oli rajoittaa edellä mainitun silmukan kestoa siten, että 20 minuutin kuluttua siirrytään joka tapauksessa mittaustilaan ja tarkastetaan painelukema. Näin vältetään silmukkaan juuttuminen. Painelukeman hyväksymisen ehtoja muutettiin siten, että se saa poiketa asetetusta paineesta enintään  $\pm 0,5$  hPa testin nopeuttamiseksi. Myös odotusaikojen pituuksia iteroitiin ja mittausohjelmasta kirjoitettiin useita hieman erilaisia versioita. Painesysteemi palautettiin välillä huoneenpaineeseen ja pidettiin sammutettuna, jolloin saatiin suljettua pois ylikuumentaminen jumiutumisen syynä. Tarkastustesti saatiin vihdoin kokonaisuudessaan läpi mittausohjelmalla *POC6\_checkout\_8.tcl*, joka löytyy liitteestä B.1. Kuvassa 30 on referenssipainemittarin data tarkastustestin ajalta. Kuvaajasta nähdään, että säädin on useaan kertaan jumiutunut ja paine on lähtenyt laskuun, mutta se on saatu korjattua asettamalla painepiste uudelleen. On selvää, että säädin ei toimi niin kuin sen pitäisi, vaikka oikeat painepisteet saavutettiin lopulta. Saavutettujen painepisteiden tarkkuus oli 25 Pa ja toistettavuus 38 Pa tai parempi. Tarkastustestit suoritettiin 12.-25.7.2012.

### Korkean painealueen kalibraatio

Säätimen jumittumista ei oltu ratkaistu, mutta seuraavaksi päätettiin kokeilla korkean painealueen kalibraatiota, jolloin ollaan eri painealueella. Referenssipainemittariksi vaihdettiin Vaisala PTU200. Korkean painealueen testit suoritettiin 26.7.-22.8.2012. Mittausohjelma perustui tarkastustestin ohjelmaan, johon tehtiin vain pieniä muutoksia. Painepisteet vaihdettiin vastaamaan korkeaa painealuetta ja painepiste asetettiin hyväksyttäväksi jos se eroaa asetetusta enintään  $\pm 1,0$  hPa. Tämä muutos tehtiin, koska korkean painealueen kalibraatiossa on löyhempi tarkkuusvaatimus (10 hPa) ja vielä ei ollut tietoa kuinka lähelle asetettuja paineita päästään korkeammissa paineissa. Kävi ilmi, että POC6-säädin toimii lähes moitteettomasti yli 20 hPa:n paineissa. Jumittumista ei ilmennyt, paineen muutokset olivat nopeita ja saavutetut paineet olivat hyvin lähellä asetettuja paineita. Ainoastaan pienimmät paineet eroavat merkittävästi asetetuista paineista, mikä johtuu siitä että painelukeman hyväksymisraja oli mittausohjelmassa  $\pm 1,0$  hPa ja muutokset matalimmissa paineissa ovat hitaimpia.

Korkean painealueen kalibraatio toistettiin myös manuaalisesti, jolloin pystyttiin tallentamaan dataa sekä säätimeltä, että referenssipaineanturilta. Tallennetusta datasta piirrettiin kuva 31, jossa näkyy sekä referenssipaine että POC6:n painelukema. Kuvaajista nähdään, että POC6:n painelukeman ja referenssipainemittarin paineen kuvaajat seuraavat hyvin tarkkaan toisiaan. POC6:n painelukema säätötilassa ei edistä systeemin paineeseen nähden. Kuvaajissa näkyy muita loivempi paineen nousu välillä 300...400 hPa. Se ei ole tarkoituksellinen, vaan säätö on hidastunut jostain syystä hetkeksi.

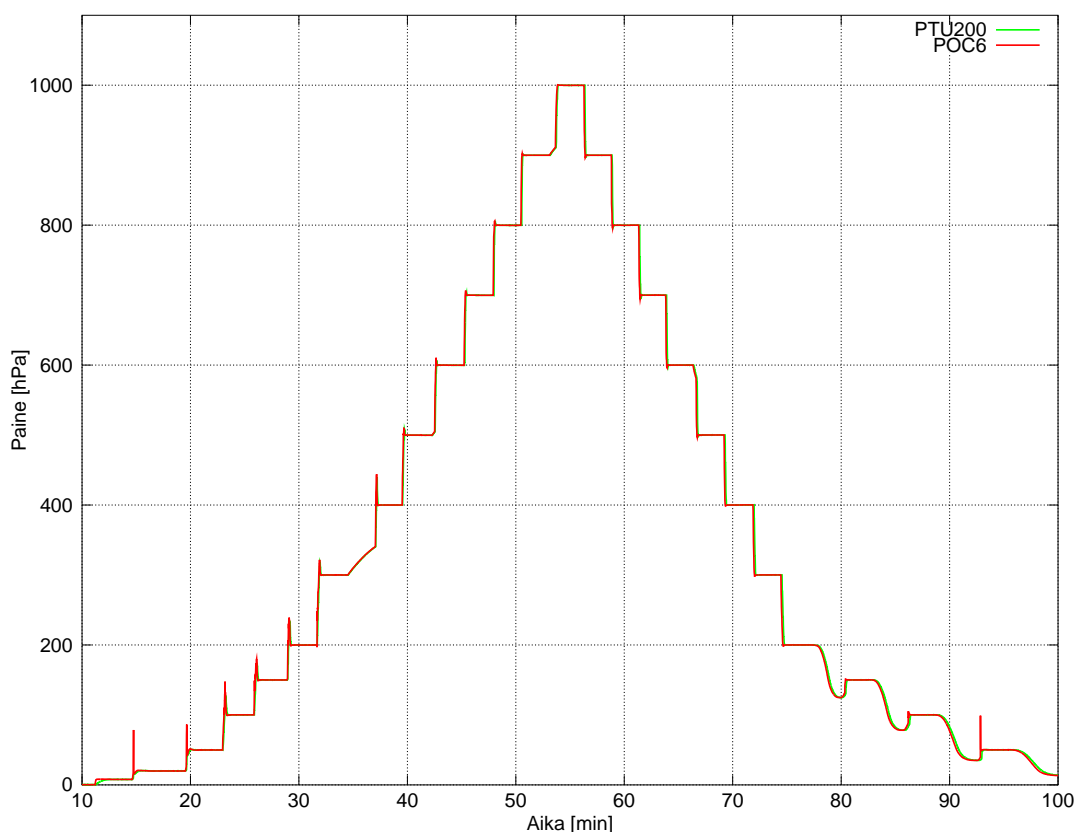


Kuva 30: Tarkastustesti automaattisesti. Kuvaaja on piirretty referenssipainemittari PTB201:n painedatasta. Säädin jumittui testin aikana useasti, mutta painepisteen uudelleenasetus palautti toiminnan. Kussakin paineessa on otettu mittausta, joka näkyy kuvaajassa vaakasuorana osuutena.

## Kalibraatio

Tarkastustesteissä ilmenneestä säätimen jumittumisesta johtuen kalibraatiotestin onnistuminen ei ollut odotettavissa. Kalibraatiota varten laajennettiin tarkastustestiä varten kirjoitettu mittausohjelma kattamaan kaikki kalibraatiossa vaadittavat painepisteet. Säädin jumittui jo 5 hPa:n kohdalla, tyhjiöstä ylöspäin painetta muutettaessa. Tästä testistä ei tallennettu painereferenssin dataa, mutta mittausohjelman lokista selvisi, että myös muiden painepisteiden kohdalla oli jo ongelmia, 3 hPa asetettiin uudelleen kuusi kertaa ja 4 hPa seitsemän kertaa.

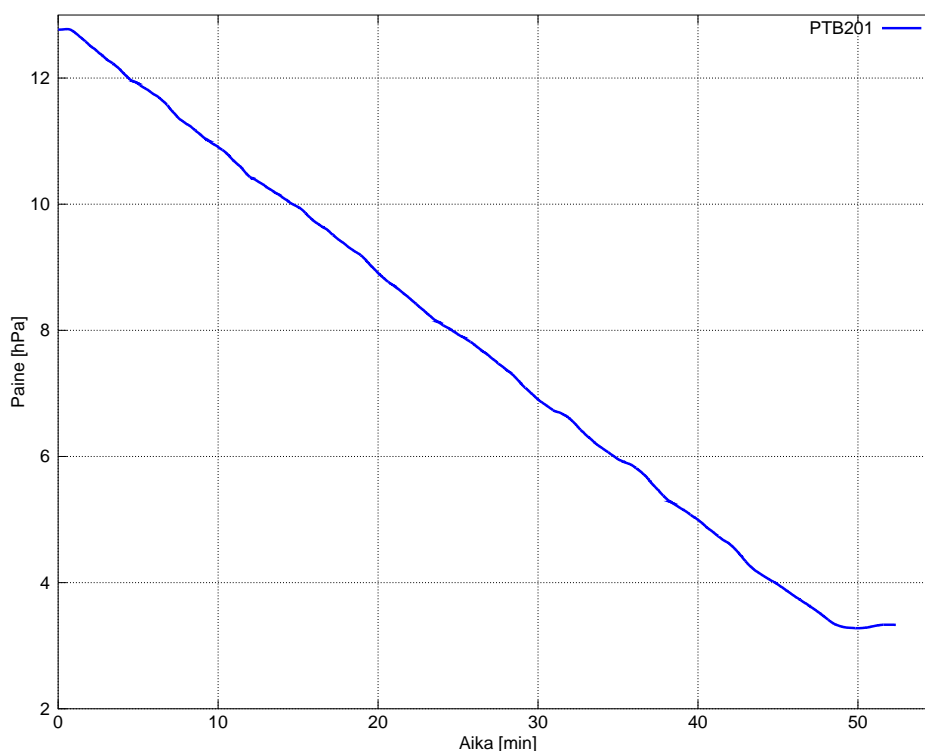
Beamexillä työskenneltiin samaan aikaan ilmiön selvittämiseksi. Säätimen jumittuminen oltiin saatu toistettua toisella säädinyksiköllä korkeammassa paineessa, mikä varmisti sen, ettei meille toimitettu yksikkö ole viallinen. Valmistaja ehdotti POC6-säätimen käyttöä pienempiä paineen muutosaskelia käyttäen, joten tässä välissä oli sopivaa siirtyä painepyyhkäisytestiin.



Kuva 31: Korkeapainekalibraatio skriptillä, eli paineen muutos tyhjiöstä vallitsevaan ilmanpaineeseen ja takaisin tyhjiöön samoin askelin. Kuvassa ovat sekä PTU200:n että POC6:n paineiden kuvajaat, jotka sijoittuvat lähes päällekkäin.

## Painepyyhkäisy

Painepyyhkäisy suoritetaan paineinstrumentin testeissä kalibroinnin yhteydessä joko kaisessa lämpötilassa. Säätimen käyttötesteissä pyyhkäisy tehtiin erillisenä testinä. Painepyyhkäisyssä halutaan saada aikaan laskeva paine 13 hPa:sta 3,5 hPa:iin siten, että paine muuttuu tasaisesti 0,2 hPa/min eli 10 Pa/30 s. Tätä varten kirjoitettiin yksinkertainen ohjelma, jossa lähtötilanteessa ollaan 13 hPa:ssa ja 30 sekunnin välein asetetaan uusi painepiste, joka on 0,1 hPa pienempi kuin edellinen. Painepyyhkäisysojmittausohjelma *POC6\_sweep\_1.tcl* on liitteessä B.1. Referenssipainemittarina käytössä oli jälleen Mars-alueen referenssi PTB201. Painepyyhkäisy onnistui ensimmäisellä yrityksellä 5.9.2012, referenssipainemittarilta tallennettu data on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32: Paineppyhkäisyn aikana referenssimittarilta tallennetut painelukemat.

### Kalibraatio pienin askelin

Paineppyhkäisyn onnistumisen jälkeen otettiin uudelleen työn alle kalibraatio, tällä kertaa samanlaisilla 0,1 hPa:n siirtymillä kuin paineppyhkäisytestissä. Erilliset ohjelmat kirjoitettiin siirtymille paineessa ylöspäin ja alaspäin, koska aiemmissa testeissä on havaittu, että säätimen jumittuminen tapahtuu yleisemmin kohti tyhjiötä säätäessä. Mittausohjelmat kirjoitettiin ottamaan mittaus ensimmäisestä painepisteestä samaan tyyliin kuin aiemmatkin ohjelmat, mutta sen jälkeen asetetaan uusi painepiste 30 sekunnin välein, kunnes ollaan saavutettu seuraava mitattava paine. Liitteessä B.1 on esimerkkinä mittausohjelma siirtymälle ylöspäin *POC6\_calib\_3.tcl*. Testi 1 hPa:sta ylöspäin epäonnistui ensimmäisellä kerralla, mutta toisella yrityksellä mittausohjelma saatiin suoritettua. Kalibraatio alaspäin 14 hPa:sta epäonnistui säätimen jumittuessa heti ensimmäisen mittauksen jälkeen.

Tässä vaiheessa testaus lopetettiin sillä uusia ajatuksia jumittumisen korjaamiseksi ei enää löytynyt. POC6 palautettiin valmistajalle 13.9.2012.

#### 4.1.6 Tulokset

Kaikkiaan POC6-paineensäädin oli testattavana IL:n avaruuslaboratoriossa kolme kuukautta. Yhteenvedo testien tuloksista on annettu taulukossa 11, johon on koottu myös muut säätimelle asetetut vaatimukset. Kuten käyttötestien aikana kävi il-

mi, POC6-paineensäätimen ajoittainen jumiutuminen aiheutti sen, että kaikki vaatimukset eivät täyttyneet. Jumiutumisen vuoksi kalibraatiota ei saatu suoritettua kokonaisuudessaan ollenkaan ja täten myöskään vaatimus luotettavuudesta ei täytynyt. Säättöaika painepisteiden välillä piteni, kun sama paine jouduttiin asettamaan moneen kertaan, eikä alle 10 minuutin keskimääräiseen säättöaikaan päästy. Jos jumiutuminen olisi saatu korjattua, on hyvin todennäköistä, että kalibraatiotestikin olisi onnistunut. Myös aikavakiotesti luultavasti onnistuisi samoin menetelmin kuin PACE-säätimen kanssa (kuvattu kappaleessa 4.2.3).

Taulukko 11: POC6-säätimen käyttötestien tulokset, sekä muiden vaatimusten täytyminen.

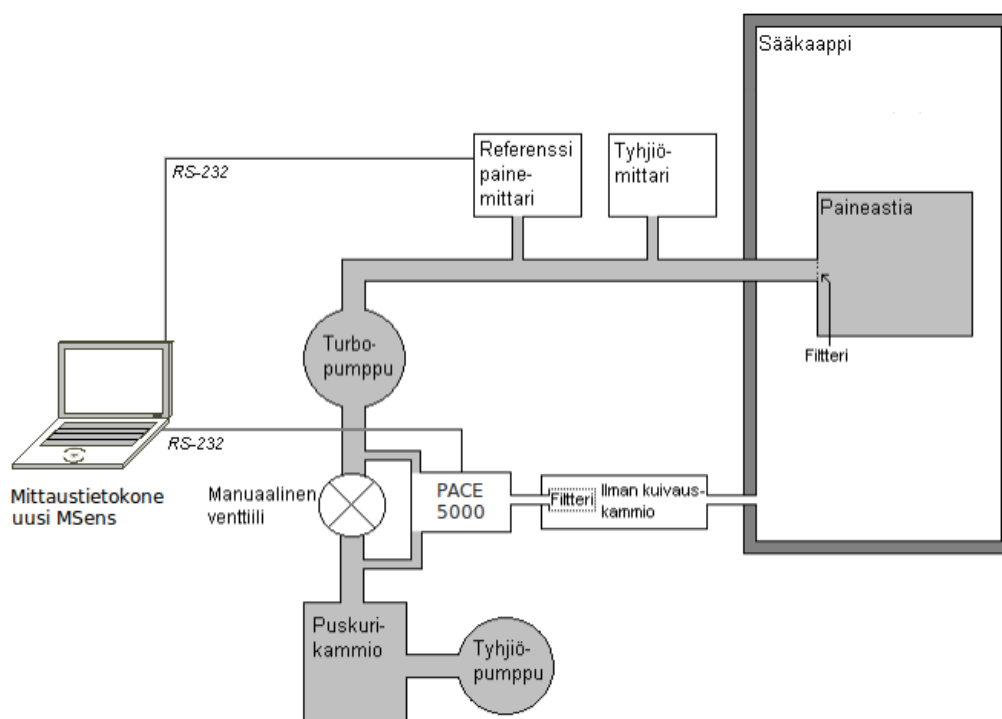
Nro	Vaatus	Arvo	Tulos
1	Liitettävissä nykyiseen painelaitteistoon		✓
2	Säädettävä painealue 0...1000 hPa		✓
	2.1 Pienin säädettävä paine alle 0,5 hPa	0,28 hPa	✓
	2.2 Tiiviys		✓
3	Suorituskyky		
	3.1 Paineen muutos 1 hPa:n askelin		✓
	3.2 Säättöaika painepisteiden välillä alle 10 min.	12,7 min	–
	3.3 Toistettavuus alle 50 Pa	38 Pa	✓
	3.4 Absoluuttinen tarkkuus 50 Pa	25 Pa	✓
	3.5 Stabiilisuus instrumentin mittauksen aikana		✓
4	Etäkäytettävyys		✓
	4.1 Paineen asetus etäyhteyden kautta		✓
	4.2 Signaalin lähetys, kun asetettu paine saavutettu		✓
5	Paineinstrumenttien testien paineensäädön suoritus		
	5.1 Tarkastustesti		✓
	5.2 Kalibraatio		–
	5.3 Korkean painealueen kalibraatio		✓
	5.4 Painepyyhkäisy		✓
	5.5 Suurtyhjiömittaus		✓
	5.6 Aikavakiotesti		–
6	Luotettavuus		–
7	Hinta		✓

## 4.2 PACE 5000

### 4.2.1 Asennus ja käyttöönotto

PACE 5000 toimitettiin IL:lle testattavaksi jälleenmyyjän toimesta syyskuussa 2012. Säädin lähetettiin postitse ja asennus suoritettiin tällä kertaa itse. Liitännät IL:n painesysteemin olivat hyvin samankaltaiset kuin POC6-säätimessäkin, ainoastaan liittimien sovittimet PACE:n paineportteihin oli hankittava erikseen. Syöttöpaine johdettiin myös tällä kertaa huoneenpaineesta kuivatuskammion kautta, vaikka käyttöohjeiden mukaisesti suositeltu paine olisi ollut 110% FS. Asennus sujui ongelmitta käyttöohjeiden asennusohjeita noudattaen ja PACE oli käyttövalmis 5.11.2012. Säädin asetettiin ensimmäisenä säätämään kohti tyhjiötä tiiviystestiä varten. Painesysteemin paineen lähestyessä Mars-aluetta alkoi säädin pitää huomattavaa ääntä, joka kuitenkin oli normaalia eikä johtunut muusta kuin paineensäätöjärjestelmän toiminnasta rasituksen alla.

Avaruuslaboratorion testilaitteiston kokoonpano muuttui hieman edellisiin POC6-säätimen testeihin verrattuna. Vanha MSens-kone jätettiin pois ja korvattiin uudella MSens-tietokoneella, jolla sekä luettiin referenssipainemittareita että ohjattiin paineensäädintä. Laitteiston kokoonpano on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33: Painekalibrointilaitteiston kokoonpano PACE-säätimen testien aikana. Vanha MSens on korvattu uudella MSensillä ja myös säätimen ohjaus tapahtuu saman tietokoneen kautta.



#### 4.2.2 Tiiviystesti ja stabiilisuus

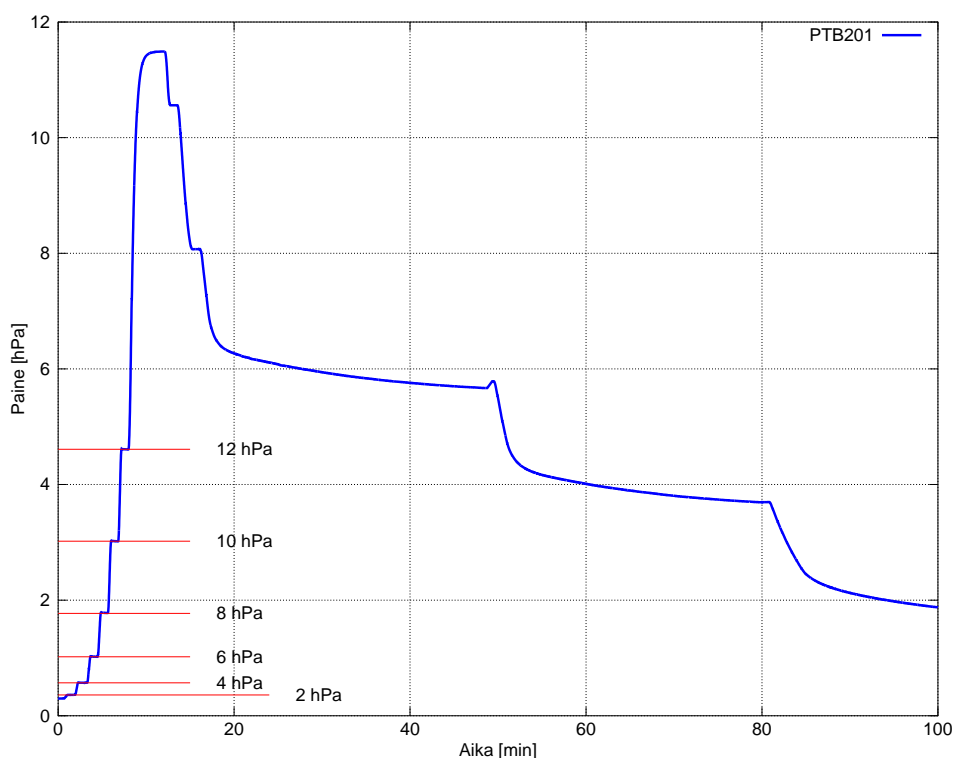
Tiiviystesti suoritettiin 6.11.2012 ja suurtyhjiön tiiviystesti 7.11.2012. Ennen tiiviystestiä painesysteemi oli pidetty alle 0,5 hPa:n paineessa 26 tuntia. Tiiviystesti suoritettiin asettamalla säädin 2 hPa:iin ja paineen tasaannuttua asettamalla säädin mittaustilaan. Painelukema otettiin ylös ja odotettiin 5 minuuttia, jonka jälkeen painelukema kirjattiin uudelleen. Lukemien erotus oli 0,01 hPa, eli tiiviystesti oli läpi. Mittaustilassa täyttyi myös vaatimus paineen stabiiliudelle mittauksen aikana. PTB201:n kalibroitu painelukema tiiviystestin alussa oli 1,57 hPa, eli PACE:n lukema poikkeaa absoluuttisesta arvosta tässä paineessa 0,42 hPa. Tiiviystestissä sillä ei kuitenkaan ole merkitystä ja alle 50 Pa:n ero referenssimittariin on hyväksytty myös painemittauksissa (selitetty luvussa 3.1). Suurtyhjiön tiiviystestissä tyhjiön paine luettiin Combitron-tyhjiömittarilta. Puolessa tunnissa saavutettiin  $1 \cdot 10^{-4}$  hPa paine, eli testi läpäistiin.

#### 4.2.3 Manuaalinen käyttö

PACE:n käyttö tapahtui hyvin samalla periaatteella kuin POC6-säätimen, joten testien suoritus oli nyt sujuvampaa. Alkuun mitattiin säätöaika huoneenpaineesta alle 0,5 hPa:n tyhjiöön. Säätöajaksi saatiin 50 minuuttia. Ajassa 109 min saavutettiin jo 0,26 hPa. Minimiaikaa suurtyhjiöön pääsemiseen ei mitattu, mutta huoneenpaineesta lähtien suurtyhjiö saavutettiin tunnissa, kun turbopumppu käynnistetään vasta paineen ollessa 0,47 hPa. Jos turbopumppu käynnistetään jo 1 hPa:n paineessa, saadaan kokonaisajasta lyhempi.

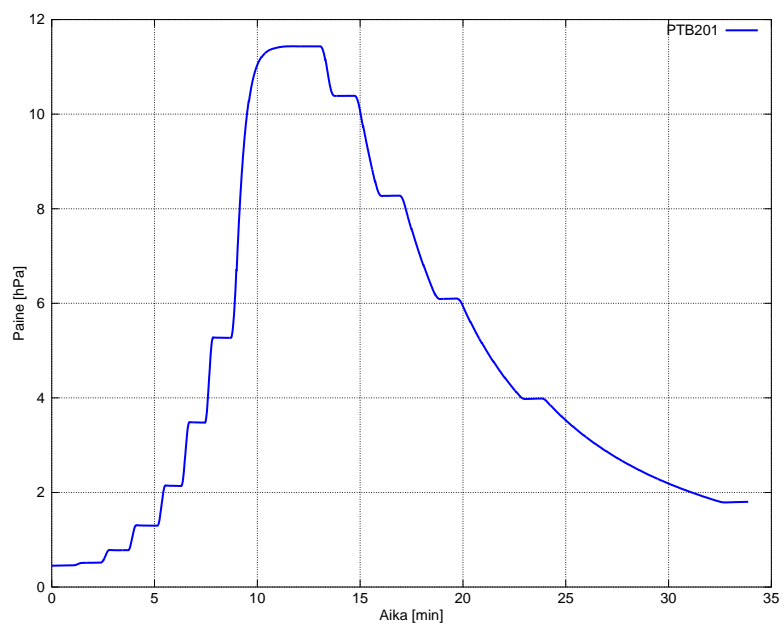
Seuraavaksi siirryttiin tarkastustestiin, joka antaa hyvän kuvan siitä kuinka säädin käyttäytyy Mars-alueella. Tarkastustestin painealue oli 2...12 hPa. Testi suoritettiin asettamalla säätimelle ensimmäinen painepiste mittaustilassa. Painepisteen asetuksen jälkeen säädin asetettiin säätötilaan. Kun säätötilan painelukema muuttui sinisestä vihreäksi, oli paine käyttäjän asettamien rajojen sisällä. Sen jälkeen säädin asetettiin mittaustilaan ja odotettiin minuutti. Tämä toistettiin jokaiselle painepisteelle. Paineessa 12 hPa odotettiin mittauksen jälkeen, että systeemin paine saavuttaa asetetun paineen ennen testin jatkamista alaspäin. Rajaksi paineen stabiilisuudelle asetettiin säätimen asetuksista  $\pm 0,005\%$  FS. Hehtopascaleina raja oli  $\pm 0,1$  hPa, kun mittausalue oli 2000 hPa. Painesysteemin paine tallennettiin PTB201-referenssimittarilta uudelle MSens-koneelle. PACE vaikutti käyttäytyvän juuri samalla tavalla kuin POC6-säädinkin ilmoittaen paineen stabiiliudesta ennenaikaisesti. 8 hPa:sta alaspäin säätimen käytös kuitenkin muuttui ja paineen muutos kohti seuraavaa painepistettä oli todella hidasta. Tämä nähdään selvästi PTB201:n datasta piirretystä kuvasta 34. Muutos 8 hPa:sta 6 hPa:iin kesti 32 minuuttia, 6 hPa:sta 4 hPa:iin 31 minuuttia ja 4 hPa:sta 2 hPa:iin 32 minuuttia. Nämä säätöajat ovat liian pitkiä, vaikka oikea paine saavutettiin. Tarkastustestin aikana säädin oli pääosin hiljainen, äänekkyys liittyy selvästi suuriin paineenmuutoksiin esimerkiksi huoneenpaineesta tyhjiöön.

PACE:n asetuksissa oli ensimmäisen testin aikana valittuna *Control mode with no overshoot*, joka tarkoittaa paineen muutosta maksiminopeudella, mutta pysyen asetettujen rajojen sisäpuolella. Asetusta muutettiin siten, että säätötila oli nyt *Control*



Kuva 34: Tarkastustesti manuaalisesti. Säädin asetettiin mittaustilaan heti näytön ilmoittaessa painepisteen olevan stabiili. Kuvaan on merkattu punaisilla poikkiviivoilla kohdat, joissa mittaukset otettiin. Kuvaajasta nähdään, että painetta ylöspäin säädettyä ilmoitus tulee ennen kuin systeemin paine ehtii muuttua asetettuun paineeseen. Sen sijaan kohti tyhjiötä säätö on todella hidasta, mutta systeemi ehtii saavuttaa asetetut paineet.

*mode with overshoot.* Myös paineen stabiiliusehtoa kiristettiin  $\pm 0,05$  hPa:iin. Tarkastustesti toistettiin samalla tavalla kuin aiemmin. Tuloksena säätöajat lyhenivät huomattavasti, esimerkiksi siirtymä 4 hPa:sta 2 hPa:iin kesti 9 minuuttia. Kuvasa 35 on PTB201:n painedata testin ajalta. *Overshootia* eli asetetun arvon ylitystä tai alitusta ei myöskään yllättäen ilmennyt. Saavutetut paineet poikkeavat edelleen asetetuista samasta syystä kuin POC6-säätimelläkin: säätötilan painelukema on laskennallinen ja mahdollisesti suuresta tilavuudesta johtuen paineenmuutokset ovat nopeampia laskennallisesti kuin todellisuudessa.

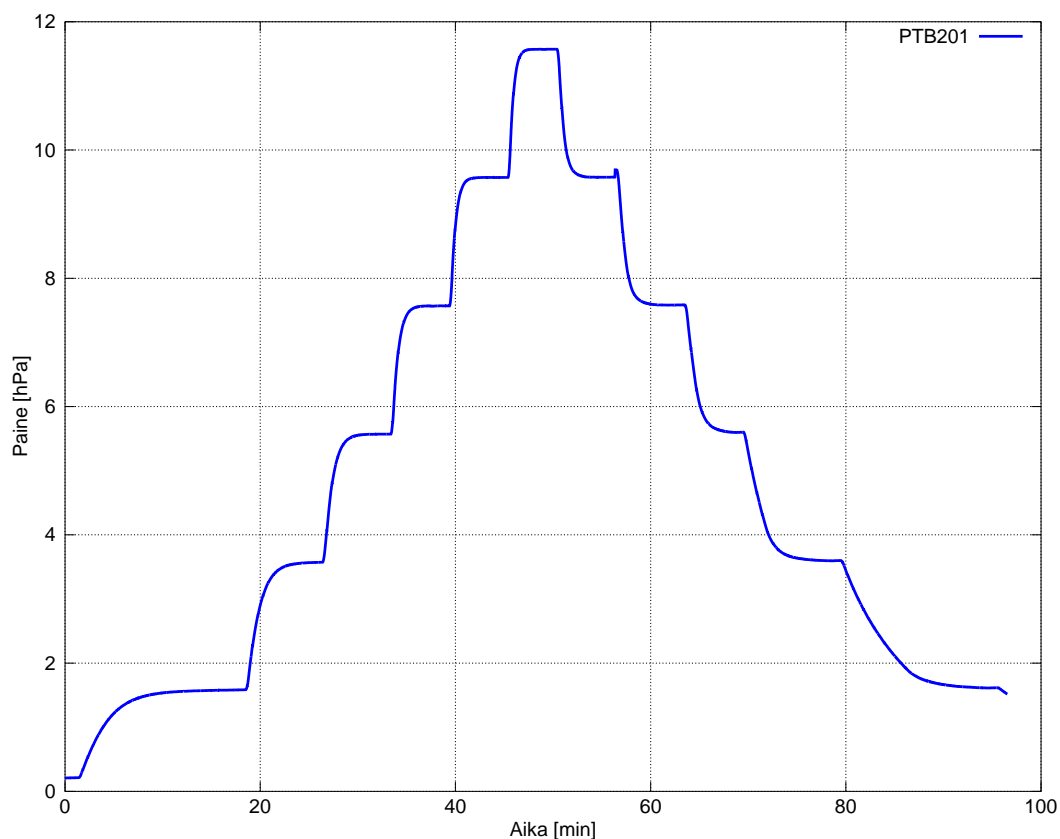


Kuva 35: Tarkastustesti manuaalisesti asetusten vaihdon jälkeen. Paineenmuutokset alaspäin tapahtuvat nyt huomattavasti nopeammin.

Taulukko 12: Siirtymäajat painepisteiden välillä PACE-säätimellä.

Siirtymä [hPa]	Aika [min]
0 – 2	15
2 – 4	7
4 – 6	6
6 – 8	5
8 – 10	5
10 – 12	4
12 – 10	4
10 – 8	5
8 – 6	5
6 – 4	8
4 – 2	14
2 – 0	20

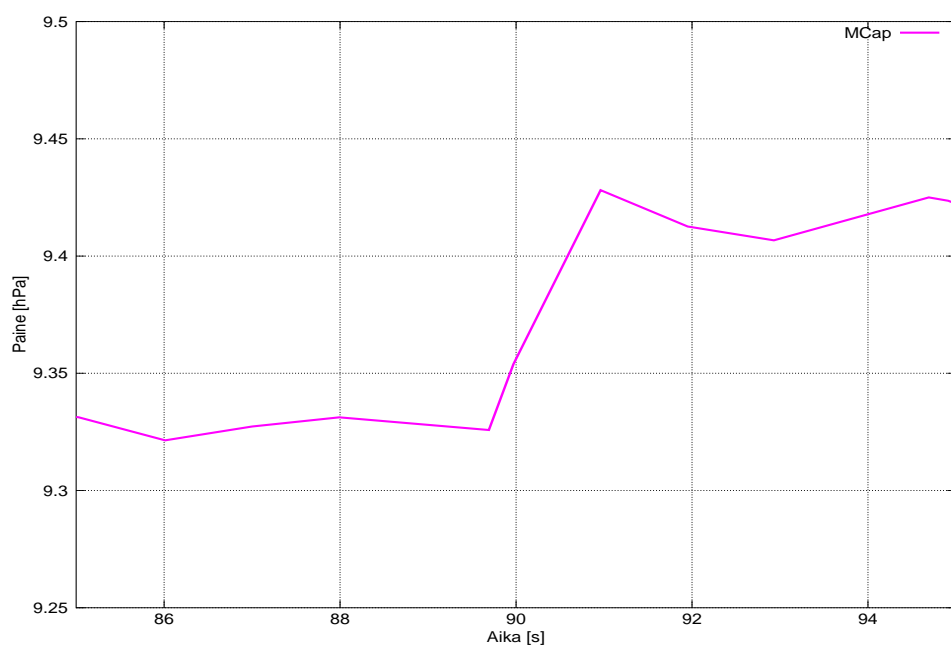
Seuraavaksi suoritettiin sama testi siten, että jokaisen painepisteen kohdalla odotettiin, että paine oli todella stabiloitunut. Systeemin painetta seurattiin PTB201:n lukemista. Tulokset säätöajoista koottiin taulukkoon 12. Painepiste 0 hPa tarkoittaa painetta alle 0,5 hPa. Taulukosta nähdään, että mitä kauempana tyhjiöstä ollaan, sitä nopeammin säätö seuraavaan painepisteeseen tapahtuu. Tämän tarkastustestin aikana PTB201:n tallennetusta datasta piirrettiin myös kuva 36. Kuvasta nähdään, että painepisteet saatiin mitattua ongelmitta. Painelukemien toistettavuus oli 4 Pa tai parempi, mikä on erinomainen tulos. Mitattujen paineiden ero PTB201:n lukemaan on 0,44 hPa tai vähemmän, eli tarkkuus on riittävä.



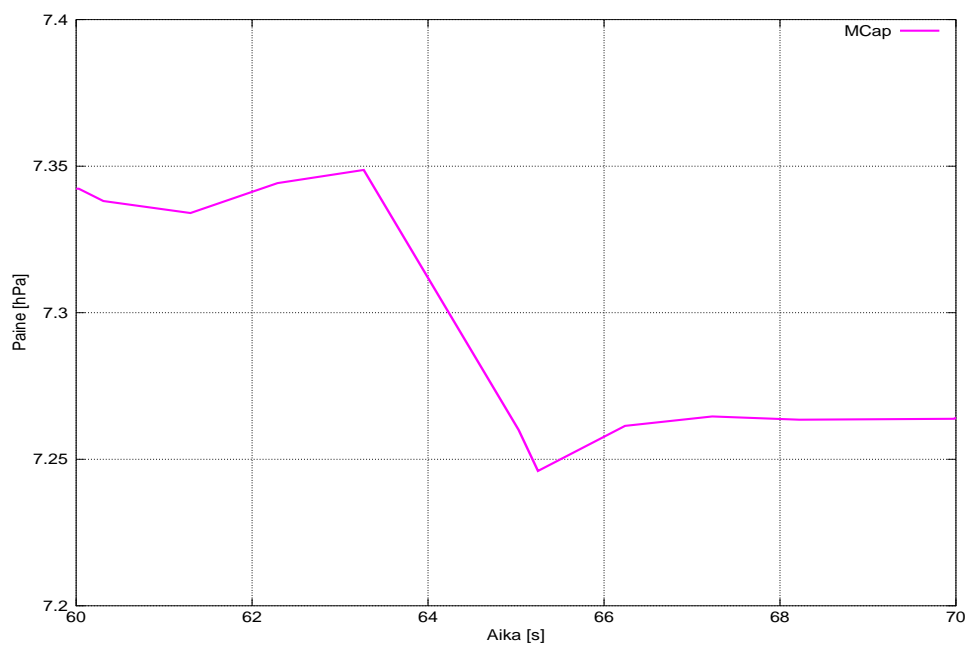
Kuva 36: Tarkastustesti manuaalisesti pitkillä stabilointiajoilla.

Manuaalisesti suoritettiin myös aikavakiotesti. PACE-säädin ei mahdollista venttiilien asentojen ohjausta suoraan joten nopeaa muutosta paineessa oli lähdettävä hakemaan käsin kosketuspaneelin kautta. PTB201 ei sovellu aikavakiotestin referenssiksi, vaan paras referenssi tähän on MCap-mittari, jota käytetään MControlin paineensäädössä säätöreferenssinä. MCapin paine on mahdollista lukea ilman keskiarvoistusta tai suodatusta vanhalla MSens-koneella, jolloin nopeat paineen muutokset näkyvät oikeanlaisina. Aikavakiotestissä referenssinä toimi siis MCap, jonka lukemaa seurattiin vanhan MSens-koneen näytöltä ja lukemat tallennettiin tiedostoon.

Testi suoritettiin Mars-paineessa, noin 8 hPa:ssa. Nopea hyppäys paineessa ylöspäin saatiin aikaan asettamalla säätimelle painepiste, joka on huomattavasti suurempi kuin 8 hPa. Sen jälkeen säädin asetettiin säätötilaan ja mahdollisimman nopeasti takaisin mittaustilaan. Vain tällöin säätöventtiili avautuu tarpeeksi, jotta noin 10 Pa:n muutos saadaan aikaan alle kahdessa sekunnissa. Nopea paineen muutos ylöspäin on esitetty MCapin datan avulla kuvassa 37. Muutoksen suuruus oli 10 Pa ja muutoksen kesto 1,3 sekuntia. Paineen muutos alaspäin kohti tyhjiötä ei onnistunut samalla menetelmällä, johtuen pienemmästä paine-erosta. Sen sijaan paineen nopea lasku tuotettiin avaamalla manuaaliventtiiliä käsin. Nopea venttiilin avaaminen tuotti halutun tuloksen, kuten kuvasta 38 nähdään. Paineen muutos oli myös alaspäin suuruudeltaan 10 Pa ja muutos aika 2,0 sekuntia. Aikavakiotesti saatiin näin suoritettua hyväksytysti.



Kuva 37: Nopea paineen muutos ylöspäin. Hyppäys saatiin aikaan antamalla säätimelle paineeksi 20 hPa, mutta pysäyttämällä säätö ennen kuin paine ehtii muuttua enempää.



Kuva 38: Nopea paineen muutos alaspäin. Muutos alaspäin saatiin aikaan avaamalla manuaaliventtiiliä käsin.

#### 4.2.4 Etäkäytön testaus

PACE-paineensäädin käyttää kommunikoinnissa SCPI-standardin mukaista syntaksia, komentorakennetta ja datan muotoilua. SCPI on yleinen standardi mittalaitteiden ja ohjelmoitavien instrumenttien ohjaukseen, jota voivat käyttää kaikki laitteet ja laitevalmistajat. SCPI ei määrittele kommunikaatiolinkkiä, vaan standardia voidaan käyttää usean erilaisen linkin yli. PACE yhdistettiin mittaustietokoneeseen RS-232 -portin kautta. [27]

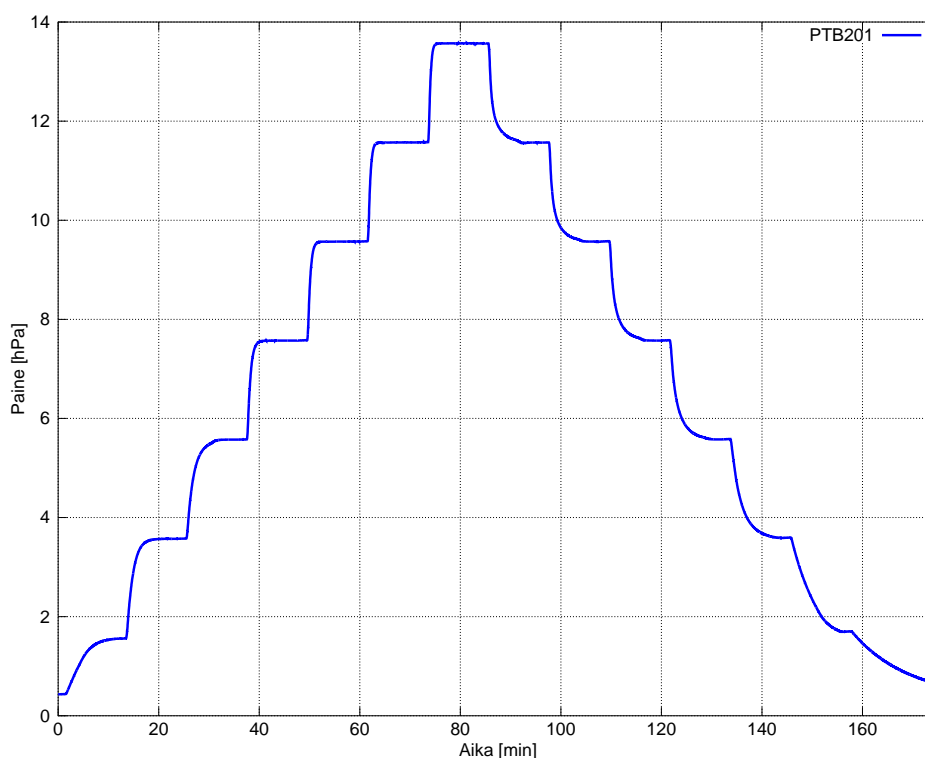
Etäkäytön testaus suoritettiin yksinkertaisten Tcl-ohjelmien avulla, joita ajettiin mittaustietokoneella. PACE oli kytkettynä mittaustietokoneen sarjaporttiin. Sarjaportin kautta lähetettiin komentoja ja vastaanotettiin dataa säätimeltä. Testien aikana säätimeltä kysyttiin painelukemaa ja toimintatilaa, asetettiin toimintatila ja kysyttiin onko paine asetetulla alueella. Painetta kysyttäessä säädin palauttaa painelukeman, joka säätötilassa on laskennallinen ja mittaustilassa todellinen paine. Kaikki PACE:n testeissä käytetyt komennot on eritelty liitteessä A.1. PACE:n kosketusnäyttö lukittuu etäyhteyttä käytettäessä, joten säätimen ohjaus manuaalisesti ja säätimen painelukemien tallennus sarjaportin yli samanaikaisesti ei onnistu, kuten POC6-säätimen testeissä.

#### 4.2.5 Automaattiset mittausohjelmat

Automaattisissa mittauksissa PACE:a ohjattiin säätämään erilaisia painepisteitä ja -olosuhteita sarjaportin kautta. Manuaalisten testien perusteella tiedettiin, että säädin saattaa ilmoittaa painepisteen olevan stabiili ennen kuin systeemin paine on todella saavuttanut asetetun paineen, ja todellisen painelukeman saamiseksi säädin on asetettava ensin mittaustilaan, samoin kuin POC6-säätimen tapauksessa. Mittausohjelmat kirjoitettiin osittain POC6-säätimen ohjelmiin perustuen.

#### Tarkastustesti

Tarkastustesti pisteissä 2...14 hPa suoritettiin testeistä ensimmäisenä 13.11.2012. Referenssipainemittarina oli PTB201, jota luettiin uudella MSensillä. Testiohjelmasta kirjoitettiin mahdollisimman yksinkertainen: säätimelle asetetaan painepiste, säädin asetetaan säätötilaan ja 10 minuutin kuluttua säätimeltä kysytään, onko asetettu painepiste saavutettu. Jos vastaus on kyllä, asetetaan säädin mittaustilaan kahdeksi minuutiksi, jonka jälkeen siirrytään seuraavaan paineeseen. Mittausohjelma *PACE\_checkout\_1.tcl* on liitteessä B.2. Tämän tarkastustestin aikana referenssimittarilta tallennettu data on esitetty kuvassa 39. Kuten kuvasta nähdään, tarkastustesti onnistui jo tällä yksinkertaisella ohjelmalla hyvin. Ero saavutetun paineen ja absoluuttisen paineen välillä johtuu PACE:n kalibraatiosta, ei siitä ettei paine olisi ehtinyt saavuttaa asetettua arvoa. PTB201:n paineen kuvaajasta nähdään myös, että paine saavutettiin nopeammin korkeammissa pisteissä. Toistettavuus tässä testissä oli 15 Pa tai parempi, suurin ero oli painepisteessä 2 hPa. Tämän pisteen yläpuolella toistettavuus oli 2 Pa tai parempi. Pidentämällä odotusaikaa alimmassa painepisteessä toistettavuus saataisiin todennäköisesti paremmaksi.



Kuva 39: Tarkastustesti automaattisesti. Mittausohjelma odotti säädön alettua aina 10 minuuttia ennen painepisteen mittausta.

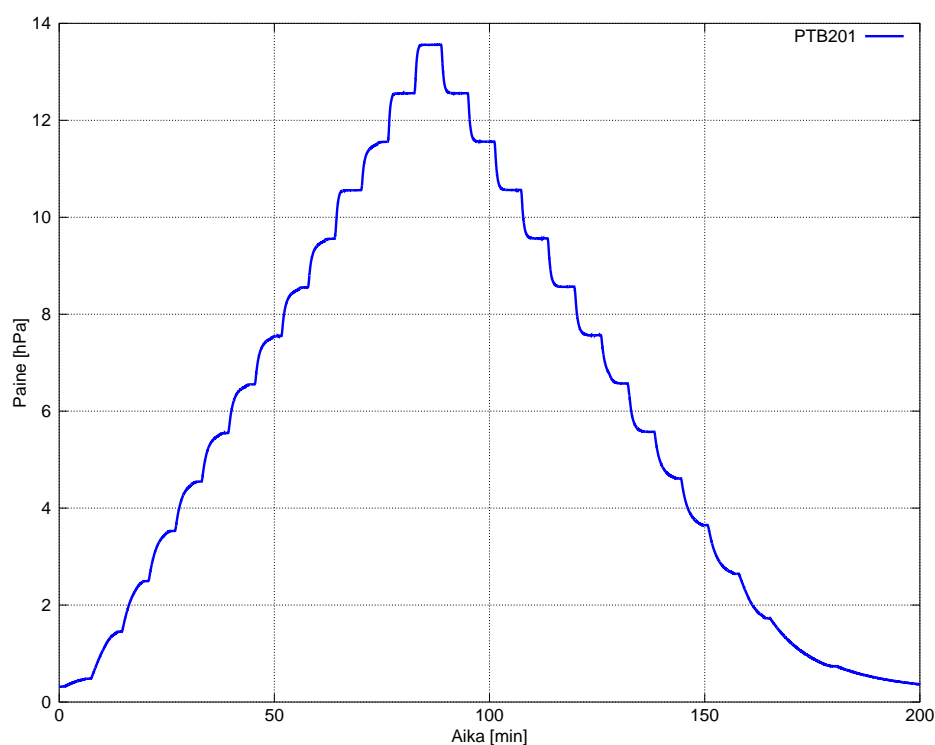
10 minuutin siirtymät painepisteiden välillä ovat vaatimusten mukaan hyväksyttäviä, mutta siirtymäaikoja haluttiin saada lyhemmäksi. Manuaalisen tarkastustestituloksista nähtiin, että osa painepisteistä saavutetaan reilusti alle 10 minuutissa jolloin odottelu pidempään on turhaa. Tarkastustesti toistettiin mittausohjelmalla, jossa odotusaikaa lyhennettiin ja ohjelmaan lisättiin painelukeman tarkastus, kuten POC6:n ohjelmissa. Säädön aloittamisen jälkeen odotetaan vain 5 minuuttia, jonka jälkeen säätimeltä kysytään onko painepiste stabiili. Tarvittaessa säätöä jatketaan minuutti kerrallaan, kunnes stabiili painepiste on saavutettu. Viidessä minuutissa ehditään saavuttaa 4 hPa korkeammat paineet ja lyhentämällä odotusaikaa koko tarkastustesti saadaan suoritettua nopeammin. Stabiiliuden tarkastamisen jälkeen säädin asetettiin mittaustilaan, paine luettiin ja sitä verrattiin asetettuun painepisteeseen. Painelukema hyväksyttiin jos se poikkesi asetetusta vähemmän kuin  $\pm 0,1$  hPa. Tässä testissä käytetty mittausohjelma *PACE\_checkout\_2.tcl* on liitteessä B.2. Testin aikana huomattiin, että säätimen mittaustilaan asettamisen jälkeen on odotettava vähintään 8 sekuntia ennen paineen lukemista, jotta mittaustilan painelukema on ehtinyt asettua. Lopputuloksena tarkastustestin kesto lyheni 100 minuuttiin ja keskimääräiseksi painepisteen saavutusajaksi saatiin 5,7 minuuttia.



## Kalibraatio

Kalibraatio paineissa 1...14 hPa suoritettiin 16.11.2012 lähes samalla ohjelmalla kuin jälkimmäinen tarkastustesti. Ainoastaan painepisteitä lisättiin kalibraatiota varten. Referenssipainemittarina oli edelleen PTB201. Paineen asetuksen jälkeen säädin asetettiin säätötilaan 5 minuutiksi. Sen jälkeen kysyttiin paineen stabiiliutta. Tarvittaessa säätöä jatkettiin minuutti, jonka jälkeen stabiiliutta kysyttiin uudelleen. Kun paine oli stabiili, asetettiin mittaustila ja paine luettiin 8 sekunnin kuluttua. Painetta verrattiin asetettuun paineeseen ja jos ero oli vähemmän kuin  $\pm 0,1$  hPa, jätettiin säädin mittaustilaan yhdeksi minuutiksi.

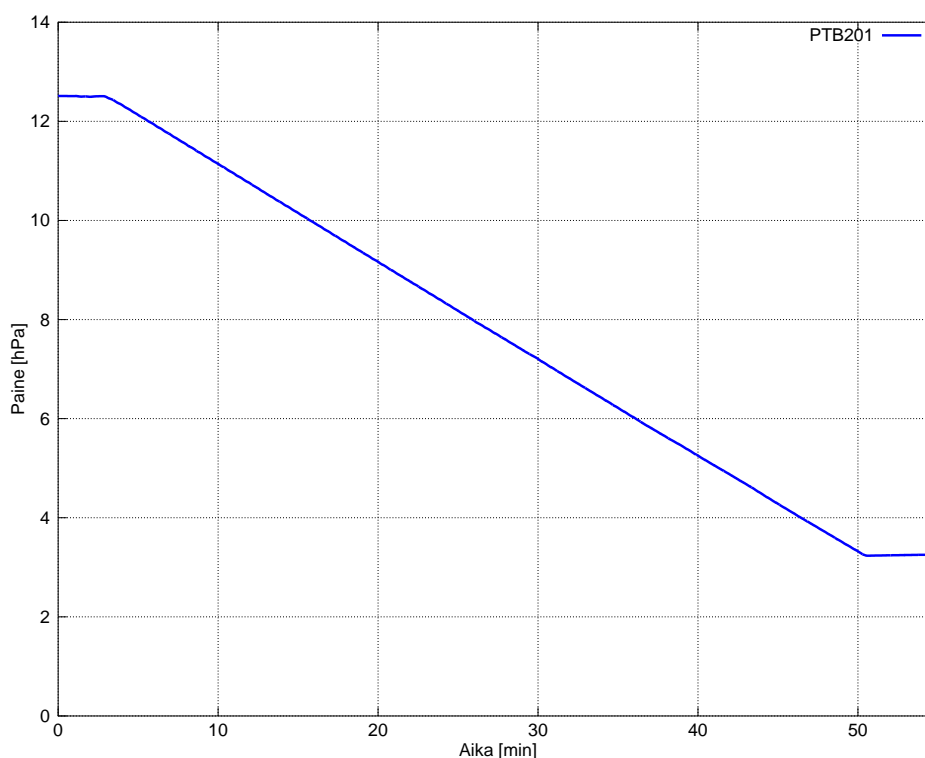
Mittausohjelma toimi odotetusti ja kalibraatio saatiin suoritettua. Kaikki paineet, jotka olivat suurempia kuin 3 hPa, saavutettiin 5 minuutin sisällä säädön aloittamisesta. Pienempien paineiden kohdalla säätöä jatkettiin stabiiliuden tarkastuksen jälkeen yksi minuutti lisää. Kalibraation aikana tallennettu referenssipaine-data PTB201:ltä on esitetty kuvassa 40. Toistettavuus oli kalibraatiossa 27 Pa tai parempi, yli 5 hPa:n paineissa 7 Pa tai parempi. Pienimpien paineiden kohdalla hienosäätämällä säätöaikaa ja asettamalla tiukempi vaatimus paine-erolle asetettuun arvoon nähden toistettavuutta saataisiin todennäköisesti vielä paremmaksi.



Kuva 40: Kalibraatio automaattisesti. Mittausohjelma odotti säädön alettua 5 minuuttia ennen paineen stabiiliuden tarkastamista. Tarvittaessa säätöä jatkettiin minuutti kerrallaan. Paine pisteen ollessa stabiili, verrattiin painetta asetettuun arvoon ennen mittauksen aloittamista.

## Painepyyhkäisy

Painepyyhkäisy 13...3,5 hPa suoritettiin 19.11.2012. Pyyhkäisyä varten ei ollut tarvetta kirjoittaa täysin uutta mittausohjelmaa vaan sarjaporttikomentoja lukuun ottamatta ohjelma oli sama kuin POC6-säätimen pyyhkäisytestissä. Säätimelle annettiin uusi painepiste 30 sekunnin välein siten, että uusi paine on aina 0,1 hPa edellistä pienempi kunnes saavutetaan 3,5 hPa. Painepyyhkäisy onnistui ensimmäisellä yrityksellä, kuvassa 41 on referenssimittari PTB201:ltä tallennettu data. Kuvasta nähdään, että paine on muuttunut vaatimusten mukaisesti hyvin tasaisesti 0,2 hPa minuutissa.

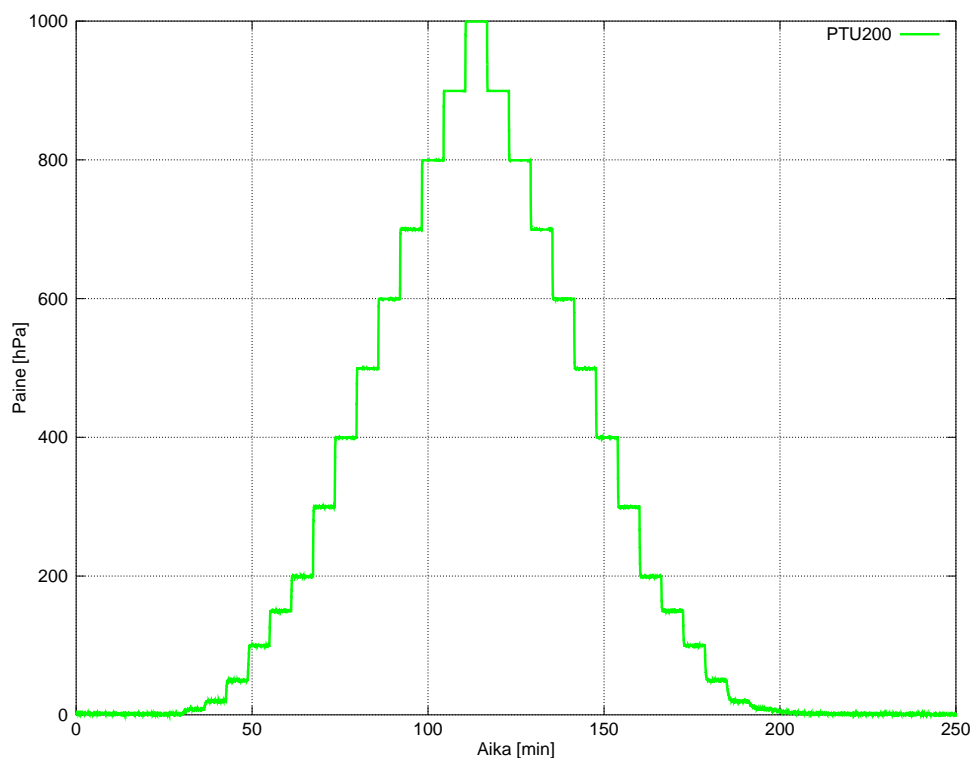


Kuva 41: Painepyyhkäisy PACE-säätimellä. Paine muttui hyvin tasaisesti 0,2 hPa minuutissa.

## Korkean painealueen kalibraatio

Korkeampien paineiden mittausta varten otettiin käyttöön referenssimittari PTU200. Painesysteemin paine nostettiin huoneenpaineeseen, jotta mittari pystyttiin liittämään painesysteemiin. Myös PTU200-mittaria luettiin uudella MSensillä. Mittarin liittämisen jälkeen painesysteemi pumpattiin jälleen tyhjiöön ja pidettiin alle 0,5 hPa:ssa tunnin ajan, kuten kaasunpoisto edellyttää. Korkean painealueen kalibraatio suoritettiin 21.11.2012. Korkean painealueen kalibraatioon käytettiin lähes sa-

maa ohjelmaa kuin kalibraatioon ja tarkastustestiin, vain painepisteiden arvot muutettiin. Saman mittausohjelman käyttö nopeuttaa testejä ja yksinkertaistaa testien suoritusta, joten se on tavoiteltavaa. Pienimmän paineen arvoksi annettiin 0,8 hPa, sillä aiempien testien perusteella tiedettiin, että se vastaa absoluuttista painetta 0,5 hPa. Testi aloitettiin alle 0,5 hPa:n paineesta, turbopumppu oli pois päältä ja manuaaliventtiili kiinni. Korkean painealueen kalibraatiotesti onnistui odotetusti ja tarkkuusvaatimus 10 hPa täyttyi kaikissa painepisteissä. Referenssimittarilta mitattu data on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42: Korkean painealueen kalibraatio. Testi suoritettiin lähes samalla mittausohjelmalla kuin kalibraatio, ainoastaan painepisteiden arvot muutettiin.

#### 4.2.6 Tulokset

PACE-paineensäätimen testit kestivät yhteensä vain kuukauden, koska jo aiemmin oltiin saatu kokemusta POC6-säätimen testeistä. Mittausohjelmat olivat samankaltaisia ja Tcl-ohjelmointikieli oli opeteltu aiempien testien yhteydessä, joten mittausohjelmien kirjoittaminen oli hyvin suoraviivaista. PACE:n testeissä ei myöskään ilmennyt ongelmia, jotka olisivat vaatineet lisää aikaa. Kaikki testit saatiin suoritettua onnistuneesti ja säädin toimi luotettavasti koko kuukauden ajan. Yhteenvedo kaikista uudelle säätimelle asetetuista vaatimuksista on esitetty taulukossa 13. Kuten taulukosta nähdään, PACE täytti kaikki vaatimukset sekä ominaisuuksien että käyttötestien osalta. Ainoa negatiivinen ominaisuus paineensäätimessä oli äänekkyys, joka ilmeni säätöjärjestelmän joutuessa rasituksen alle suurien paineenmuutosten aikana. Melutasoa voidaan yrittää laskea äänieristyksellä, mutta siihen asti on suositeltavaa käyttää kuulosuojaimia tarpeen mukaan.

Taulukko 13: PACE-säätimen käyttötestien tulosten yhteenvedo.

Nro	Vaatus	Arvo	Tulos
1	Liitettävissä nykyiseen painelaitteistoon		✓
2	Säädettävä painealue 0...1000 hPa		✓
	2.1 Pienin säädettävä paine alle 0,5 hPa	0,26 hPa	✓
	2.2 Tiiviys		✓
3	Suorituskyky		
	3.1 Paineen muutos 1 hPa:n askelin		✓
	3.2 Säättöaika painepisteiden välillä alle 10 min.	5,7 min	✓
	3.3 Toistettavuus alle 50 Pa	4 Pa	✓
	3.4 Absoluuttinen tarkkuus 50 Pa	44 Pa	✓
	3.5 Stabiilisuus instrumentin mittauksen aikana		✓
4	Etäkäytettävyys		✓
	4.1 Paineen asetus etäyhteyden kautta		✓
	4.2 Signaalin lähetys, kun asetettu paine saavutettu		✓
5	Paineinstrumenttien testien paineensäädön suoritus		
	5.1 Tarkastustesti		✓
	5.2 Kalibraatio		✓
	5.3 Korkean painealueen kalibraatio		✓
	5.4 Painepepyhkäisy		✓
	5.5 Suurtyhjiömittaus		✓
	5.6 Aikavakiotesti		✓
6	Luotettavuus		✓
7	Hinta		✓

## 5 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko Ilmatieteen laitoksen painekalibrointilaitteiston paineensäätöjärjestelmä korvata kaupallisella paineensäätimellä. Jatkotavoitteena oli sopivan säätimen löytyessä testata säätimen toiminta IL:n laitteiston kanssa. Molemmat tavoitteet täyttyivät ja testattavaksi saatiin kaksin kaupallista paineensäädintä.

Toinen säätimistä, GE Druck PACE 5000 -paineensäädin, täytti kaikki uudelle paineensäätimelle asetetut vaatimukset. Säädin pystyttiin yhdistämään suoraan nykyiseen painelaitteistoon ja kaikki käyttötestit saatiin suoritettua ongelmitta. Tämän työn aikana syntyi myös mittausohjelmia ja testiproseduureja, joita voidaan hyödyntää tulevaisuudessa. Työn lopputuloksena PACE-paineensäädintä ehdotettiin hankittavaksi Ilmatieteen laitoksen avaruuslaboratorioon. Ehdotettu malli oli PACE 5000 2 bar gauge-anturilla, CM1- tai CM2-moduulilla. Mittausalueeksi valittiin 2 bar g, koska tällöin Mars-painealue sijoittuu painemittarin mittausalueen keskivaiheille. 1 bar gauge-anturilla oltaisiin anturin mittausalueen ääripäässä, jolloin tarkkuus ei yleensä ole paras mahdollinen. Myös testatussa esittelymallissa oli 2 bar gauge-anturi, joten sen toiminta tunnetaan hyvin. Tätä kirjoitettaessa uuden paineensäätimen hankinnasta ei ole vielä tehty lopullista päätöstä.

PACE-säätimestä on tarjolla kaksi eri runkovaihtoehtoa, joista PACE 5000:een voidaan asentaa yksi paineensäätömoduuli ja PACE 6000:een kaksi moduulia. IL:n tarpeisiin ehdotettiin hankittavaksi ensin yksi PACE 5000 -malli ja tarvittaessa lisäksi toinen 5000-malli. Toista paineensäädintä olisi mahdollista käyttää kosteusinstrumenttien testeissä, jotka voisivat siten olla käynnissä samaan aikaan paineinstrumenttien testien kanssa. PACE 6000 toki mahdollistaisi kahden moduulin yhtäaikaan käytön, mutta loppujen lopuksi se toisi enemmän rajoitteita kuin kahden erillisen säätimen käyttö.

Painealueen muuttaminen vain säätömoduulia vaihtamalla mahdollistaa saman paineensäätöjärjestelmän käytön vaikka painealue muuttuisi. Tämä tilanne saattaa tulla vastaan esimerkiksi planeettamissioissa muualle kuin Marsiin. IL:n yksi paineinstrumenttihan on laskeutunut jo Titaniin, joten tulevaisuudessakin tämä on aivan mahdollista.

### 5.1 Tulevaisuuden suunnitelmia

Vaikka PACE-paineensäätimen hankinnasta ei ole vielä lopullista varmuutta, on säätimen yhdistäminen osaksi uutta painekalibrointijärjestelmää jo alustavasti suunniteltu. PACE:n ohjaus tultaisiin yhdistämään uuteen MSens-ohjelmaan kirjoittamalla säätimelle oma proseduurikirjasto MSens-ohjelman käyttöön. Myös sääkaappi on yhdistettävissä MSens-ohjelmaan samalla periaatteella. Siten samaan mittausohjelmaan voidaan kirjoittaa niin ympäristöolosuhteinen säätö kuin instrumenttien mittauskin. Manuaalinen venttiili on mahdollista korvata sähköisesti ohjatulla venttiilillä, jolloin saataisiin automaattisten mittauksien yhteydessä parempi tyhjiö. Suurtyhjiön aikaansaamiseksi olisi tutkittava, onko turbopumppua mahdollista ohjata etäyhteyden kautta.

Myös olemassa olevaa painelaitteistoa on mahdollista kehittää paremmaksi yksinkertaisin keinoin. Painesysteemin tilavuutta voidaan pienentää huomattavasti suunnittelemalla mittausjohtojen läpivienti uudelleen, muilla tavoin kuin suurikoisen läpivientipurkin kautta. Paineputkiston kokoonpanossa tulisi huomioida putkiston konduktanssi ja välttää ohuita, pitkiä yhdysputkia. Esimerkiksi turbopumppu tulisi yhdistää järjestelmään lähelle tyhjiökammiota läpimitaltaan mahdollisimman suurella yhdyskappaleella konduktanssin parantamiseksi. Materiaalivalinnat vaikuttavat myös siihen, kuinka hyvään tyhjiöön järjestelmällä on mahdollista päästä ja paineensäätimien testien aikana käytetyt muoviset yhdysputket kannattaa vaihtaa metallisiin. Tyhjiöpumppuun on lisättävä poistoputki pois huoneilmasta, sillä sitä kautta tyhjiöpumpusta poistuu pumppauksessa syntyneitä öljyhöyryjä, jotka ovat ihmiselle haitallisia hengitettynä.

## 5.2 Vaihtoehtoiset toteutustavat

Vaikka nykyisen paineensäätöjärjestelmän korvaajaksi löydettiin kaupallinen paineensäädin, jäi tämän opinnäytetyön ulkopuolelle järjestelmän uudistaminen tai rakentaminen itse olemassa olevaa laitteistoa hyödyntäen. Kaupallisen paineensäätimen huonona puolena on se, että säädin on ikään kuin musta laatikko, eikä sen ohjelmiston tai säädinelektroniikan toiminnasta saada kuin rajallisesti tietoa. Yksi vaihtoehto kaupalliselle säätimelle olisi siirtää MControl-ohjelma vanhalta DOS-koneelta uudempaan ympäristöön, mutta käyttää olemassa olevaa ohjauselektroniikkaa. Nykyisen paineensäätöjärjestelmän solenoidiventtiilien ohjauselektroniikka olisi myös mahdollista korvata esimerkiksi mikrokontrollerilla ja uudella MControl-tyyppisellä ohjelmistolla. Itse tehty säätöjärjestelmä mahdollistaisi järjestelmän rakentamisen täsmälleen sovelluksen mukaan ja myös järjestelmän muokkaamisen ja parantamisen myöhempiä tarpeita varten. Huonona puolena itse rakennetussa järjestelmässä on se, että kehitys vie paljon aikaa ja vaatii pitkälistä testausta järjestelmän toiminnan optimoimiseksi.

## Viitteet

- [1] Ilmatieteen laitoksen mittalaitteita avaruudessa. Verkkosivu, Ilmatieteen laitos. Viitattu 8.1.2013. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/avaruushavainnot>.
- [2] Vaisala Barocap<sup>®</sup> -anturi paineen mittaamiseen. Teknologia-kuvaus, verkkodokumentti. Vaisala Oyj, Ref. B210845FI-B, 2012. Viitattu 20.12.2012. Saatavissa: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CEN-TIA-BAROCAP-Technology-description-B210845FI-B.pdf>.
- [3] Haberle, R., McKay, C., Schaeffer, J., Cabrol, N., Grin, E., Zent, A., Quinn, R. On the possibility of liquid water on present-day Mars. *J. Geophys. Res.*, Vol.106(E10), s. 23317-23326, DOI: 10.1029/2000JE001360, 2001.
- [4] Karttunen, H., Donner, K. J., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M. *Tähtitieteen perusteet*. Neljäs laitos, Ursan julkaisuja 87, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, Helsinki, 2003.
- [5] Taylor, P., Kahanpää, H., Weng, W., Akingunola, A., Cook, C., Daly, M., Dickinson, C., Harri, A.-M., Hill, D., Hipkin, V., Polkko, J. ja Whiteway, J. On pressure measurement and seasonal pressure variations during the Phoenix mission. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115(E00E15), DOI:10.1029/2009JE003422, 2010.
- [6] Tillman, J. E., Johnson, N. C., Guttorp, P. ja Percival, D. B. The Martian Annual Atmospheric Pressure Cycle: Years Without Great Dust Storms. *J. Geophys. Res.*, Vol. 98(E6), s. 10963-10971, DOI: 10.1029/93JE01084, 1993.
- [7] Kahanpää, H. *REMS-P Pressure Sensor FM Test Procedures*. Ilmatieteen laitoksen tekninen dokumentti, dokumenttinumero: FMI-REMS-TPO-0096, versio: 1.0, päiväys: 6.4.2009. Tämä dokumentti ei ole julkinen.
- [8] Frontell, A., Maula, J., Nieminen, R., Söderlund, C., Valli, K., Vehanen, A., Vulli, M. ja Ylilammi, M. *Tyhjiötekniikka*. Suomen tyhjiöseura Ry, 1986.
- [9] Hata, D. M. *Introduction to Vacuum Technology*. New Jersey, Prentice Hall, 2007.
- [10] Saxholm, S. ja Rantanen, M. Paineen mittaus, J1/2011, Mittatekniikan keskus, Espoo, 2011.
- [11] Ikonen, E., Lehto, A., Wallin, P., Äijälä, A. *Anturitekniikan perusteita*. 3. painos. Teknillinen korkeakoulu, Mittaustekniikan laboratorio. Picaset Oy, Espoo, 2000.
- [12] Vacuum Technology Products. Tuotekatalogi, Kurt J. Lesker Company, 9. painos.

- [13] *Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum*. The Institute of Measurement and Control. London 1998.
- [14] MIKES Metrologia. Verkkosivu, Mittatekniikan keskus. Päivitetty 5.9.2011, viitattu 8.5.2012. Saatavissa: <http://www.mikes.fi/frameset.aspx?url=metrologia.aspx%3fcategoryID=3>.
- [15] Saxholm, S., erikoistutkija. Mittatekniikan keskus, Espoo. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu 4.2.2013.
- [16] FPG8601 Force Balanced Piston Gauge Reference Level Calibration System for Very Low Pressure. Tuote-esite, DH Instruments, a Fluke Company, 1. painos, Yhdysvallat, 2007.
- [17] FPG8601<sup>TM</sup>/VLPC<sup>TM</sup> Operation and Maintenance Manual. Käyttö- ja huolto-ohje, DH Instruments, a Fluke Company, Yhdysvallat, 2007.
- [18] PPC4<sup>TM</sup> Pressure Controller/Calibrator Operation and Maintenance Manual. Käyttö- ja huolto-ohje, DH Instruments, a Fluke Company, Dokumenttinumero 3306047, versio 3, Yhdysvallat, 2009.
- [19] Fluke Calibration PPC4 Pressure controller. Verkkosivu, Fluke Corporation. Viitattu: 11.1.2013. Saatavissa: <http://us.flukecal.com/products/pressure-calibration/pressure-controllercalibrators/ppc-pressure-controllerscalibrators/p-4>.
- [20] Kahanpää, H. Mars Phoenix -luotaimen paineinstrumentin testaus ja datankäsittelyalgoritmien kehitys. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu, Espoo, 2011.
- [21] Sinivirta, H. *FMI/Space Test & Calibration Lab Hardware Description*. Ilmatieteen laitoksen tekninen dokumentti, dokumenttinumero: FMI\_S-CALLAB-DS-001-AD-00.
- [22] Lehto, A., Kahanpää, H., Kyhäräinen, S., Haapanala, S. *Kalibrointilaboratorio-dokumentaatio*. Ilmatieteen laitos/Geofysiikan tutkimus, koottu 31.8.1999.
- [23] Kahanpää, H., Genzer, M. *Equipment Calibration and Certification Plan*. Ilmatieteen laitoksen tekninen dokumentti. Dokumenttinumero: FMI\_S-CALLAB-PL-001-AD-05, versio 1.5, päiväys: 14.11.2011. Tämä dokumentti ei ole julkinen.
- [24] Beamex<sup>®</sup> POC6 Automatic Pressure Controller User Guide. Versio 1.1, dokumenttinumero: 8889750/UEPOC6/111701, Beamex OY AB, Pietarsaari.
- [25] PACE Pressure Automated Calibration Equipment, User manual K0443. Käyttöohje, Versio 3, GE Sensing & Inspection Technologies, The General Electric Company.



- [26] PACE Series Modular Pressure Controller. Verkkosivu, General Electric company, 2013. Viitattu: 14.1.2013. Saatavissa: <http://www.ge-mcs.com/en/pressure-and-level/controllersindicators/pace-series.html>.
- [27] PACE Pressure Automated Calibration Equipment, SCPI Remote Communications manual K0472. Käyttöohje, Versio 4, GE Measuremet & Control, The General Electric Company, 2012.

## A Paineensäätimien sarjaporttikomennot

### A.1 POC6-säädin

Alla olevassa taulukossa on listattuna kaikki POC6-säätimen testien aikana käytetyt sarjaporttikomennot. Nämä komennot esiintyvät POC6-säätimelle kirjoitetuissa testiohjelmissa. Sarjaporttikomennot eivät ole julkisia, joten esitetyt komennot on muutettu.

Taulukko A1: POC6-säätimen komennot

Komento	Selitys
PRES?	Palauttaa painelukeman
CTRL	Asettaa laitteen säätötilaan
CTRL?	Palauttaa YES/NO
MEAS	Asettaa laitteen mittaustilaan
MEAS?	Palauttaa YES/NO
SETP P	Asettaa tavoitepaineeksi P hPa
ERR?	Palauttaa viimeisimmän virheviestin
MOD?	Palauttaa toimintatilan
STBL?	Palauttaa YES/NO
ULIM ?	Palauttaa säätöalueen asetetun ylärajan
LLIM ?	Palauttaa säätöalueen asetetun alarajan
ULIM P	Asettaa säädön ylärajaksi P hPa
LLIM P	Asettaa säädön alarajaksi P hPa

## A.2 PACE 5000-säädin

PACE-paineensäädin käyttää etäyhteydessä SCPI-standardia. Alla olevassa taulukossa on listattuna kaikki säätimen testien aikana käytetyt komennot, jotka esiintyvät PACE-säätimelle kirjoitetuissa testiohjelmissa. [27]

Taulukko A2: PACE-säätimen komennot

Komento	Selitys
:SENS:PRES?	Palauttaa painelukeman
:OUTP:STAT ON	Asettaa laitteen säätötilaan
:OUTP:STAT?	Palauttaa YES/NO
:OUTP:STAT OFF	Asettaa laitteen mittaustilaan
:SOUR:PRES P	Asettaa tavoitepaineeksi P hPa
:SENS:PRES:INL?	Palauttaa YES/NO
:SENS:PRES:RANG?	Palauttaa mittausalueen
:SENS:PRES:RANG P bara	Asettaa mittausalueeksi P baria absoluuttipainetta
:LOC	Asettaa näytön lukituksen pois päältä

## B Mittausohjelmat

### B.1 POC6-säätimen testeissä käytetyt mittausohjelmat

#### B.1.1 *POC6\_checkout\_8.tcl*

```
# Tarkastustesti 2 hPa-14 hPa edestakaisin, mittaus 2 min
# Stabiilisuutta kysytään 10 min ajan ja vaikka ei olisi,
# otetaan mittaus

# Rajat hyväksymiselle +-0,5 hPa

# Oletuksena ollaan alle 2 hPa paineessa,
# manuaaliventtiili kiinni ja turbopumppu
# pois päältä. POC6:ssa tila "Measure".

# Sarjaportin konfiguraatio
set serial [open "/dev/ttyUSB0" RDWR]
configure $serial -mode "9600,n,8,1"
configure $serial -blocking 0 -buffering none

# Painepisteet
set p(1) 2
set p(2) 4
set p(3) 6
set p(4) 8
set p(5) 10
set p(6) 12
set p(7) 14

set size [array size p]

#####
# Ylöspäin

set n 1
set systemTime [clock seconds]
puts "Start time: [clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

while {$n <= $size} {
    # Otetaan mittaus
    puts -nonewline $serial "MEAS\r"
    after 2000
    puts -nonewline $serial "PRES?\r"
    after 1000
```

```

set paine "[read $serial]"

# Jos mittaus ei ole tarpeeksi lähellä asetettua arvoa,
# aloitetaan säätö uudestaan
while {$paine < [expr $p($n) - 0.5] || $paine >
[expr $p($n) + 0.5]} {
    set i 0
    puts -nonewline $serial "SETP $p($n)\r"
    puts "Pressure poin $p($n) hPa set"
    puts -nonewline $serial "CTRL\r"
    puts "Control started"
    after 180000
    puts -nonewline $serial "STBL?\r"
    after 1000
    set stable "[read $serial]"

    # Jatketaan säätö kunnes painepiste on stabiili
    while {[string compare -length 3 $stable " NO"]
== 0 && $i <= 600} {
        puts -nonewline $serial "STBL?\r"
        after 1000
        set stable "[read $serial]"
        set i [expr {$i + 1}]
    }

    puts -nonewline $serial "MEAS\r"
    after 2000
    puts -nonewline $serial "PRES?\r"
    after 1000
    set paine "[read $serial]"
}

set systemTime [clock seconds]
puts "Pressure $p($n) hPa stable, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

# Mittaus 2 min
puts -nonewline $serial "MEAS\r"
puts "Measuring for 2 min"
after 120000
puts -nonewline $serial "PRES?\r"
after 1000
set paine "[read $serial]"
puts "Pressure: $paine"
set systemTime [clock seconds]

```

```

puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"
set n [expr {$n + 1}]
}

#####
# Alaspäin

set a [array size p]
set n [expr $a - 1]

while {$n > 0} {
  puts -newline $serial "MEAS\r"
  after 2000
  puts -newline $serial "PRES?\r"
  after 1000
  set paine "[read $serial]"

  while {$paine < [expr $p($n) - 0.5] || $paine >
[expr $p($n) + 0.5]} {
    set j 0
    puts -newline $serial "SETP $p($n)\r"
    puts "Pressure poin $p($n) hPa set"
    puts -newline $serial "CTRL\r"
    puts "Control started"
    after 300000
    puts -newline $serial "STBL?\r"
    after 1000
    set stable "[read $serial]"

    while {[string compare -length 3 $stable " NO" ]
== 0 && $j <= 600} {
      puts -newline $serial "STBL?\r"
      after 1000
      set stable "[read $serial]"
      set j [expr {$j + 1}]
    }

    puts -newline $serial "MEAS\r"
    after 2000
    puts -newline $serial "PRES?\r"
    after 1000
    set paine "[read $serial]"
  }

set systemTime [clock seconds]

```

```

puts "Pressure $p($n) hPa stable, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

# Mittaus 2 min
puts -newline $serial "MEAS\r"
puts "Measuring for 2 min"
after 120000
puts -newline $serial "PRES?\r"
after 1000
set paine "[read $serial]"
puts "Pressure: $paine"
set systemTime [clock seconds]
puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"
set n [expr {$n - 1}]
}

puts "Script finished, going back to vacuum"
puts -newline $serial "SETP 0\r"
puts -newline $serial "CTRL\r"
after 600000
puts -newline $serial "MEAS\r"
close $serial

```

### B.1.2 POC6\_sweep\_1.tcl

```

# PAINEPYYHKÄISY
# 13 hPa -> 3,5 hPa. Nopeus 20 Pa/min eli 10 Pa/30 s.

# Oletuksena ollaan 13 hPa paineessa,
# manuaaliventtiili kiinni ja turbopumppu
# pois päältä. POC6:ssa tila "Measure".

# Sarjaportin konfiguraatio
set serial [open "/dev/ttyUSB0" RDWR]
configure $serial -mode "9600,n,8,1"
configure $serial -blocking 0 -buffering none

# Painepisteet
set p(1) 13
set p(2) 3.5

set size [array size p]

#####

set n $p(1)
set systemTime [clock seconds]
puts "Start time: [clock format $systemTime -format %H:%M:%S] "

while {$n >= $p(2)} {
    # Asetetaan painepiste
    puts -nonewline $serial "SETP $n\r"
    # Odotetaan 30 s.
    after 30000
    # Asetetaan uusi n
    set n [expr {$n - 0.1}]
}

puts "Script finished"
puts -nonewline $serial "CTRL\r"
after 600000
puts -nonewline $serial "MEAS\r"
close $serial

```



### B.1.3 POC6\_calib\_3.tcl

```

# Kalibrointi 1 hPa–14 hPa ylöspäin, mittaus 2 min
# Siirtymä suoritetaan pienillä stepeillä:
# Siirtymän ajaksi lasketaan 5 min eli 1 hPa/300 s.
# Siirtymät tehdään 0,1 hPa:n välein.
# eli lisätään/vähennetään 0,1 30 s. välein.

# Rajat hyväksymiselle +-0,1 hPa

# Oletuksena ollaan alle 1 hPa paineessa,
# manuaaliventtiili kiinni ja turbopumppu
# pois päältä. POC6:ssa tila "Measure".

# Sarjaportin konfiguraatio
set serial [open "/dev/ttyUSB0" RDWR]
configure $serial -mode "9600,n,8,1"
configure $serial -blocking 0 -buffering none

# Paine pisteet
set p(1) 1
set p(2) 14

set size [array size p]

#####
# Ylöspäin

set n 1
set systemTime [clock seconds]
puts "Start time: [clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

for { set j 1 } { $j <= 14 } { incr j } {
    # Asetetaan painepiste
    puts -nonewline $serial "SETP $n\r"
    puts -nonewline $serial "CTRL\r"
    puts "Pressure point $n hPa set"
    # Odotetaan 30 s.
    after 30000

    puts -nonewline $serial "STBL?\r"
    after 1000
    set stable "[read $serial]"

    while {[string compare -length 3 $stable " NO"]} {

```

```

    puts -nonewline $serial "STBL?\r"
    after 1000
    set stable "[read $serial]"
}

# Otetaan mittaus
puts -nonewline $serial "MEAS\r"
puts "Measuring for 2 min"
after 120000
puts -nonewline $serial "PRES?\r"
after 1000
set paine "[read $serial]"
puts "Pressure: $paine"
set systemTime [clock seconds]
puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

# Asetetaan uusi painepiste pienin askelin
for { set i 1 } { $i <= 10 } { incr i } {
    set n [expr {$n + 0.1}]
    puts -nonewline $serial "SETP $n\r"
    after 1000
    puts -nonewline $serial "CTRL\r"
    after 30000
}
}

```

## B.2 PACE-säätimen testeissä käytetyt mittausohjelmat

### B.2.1 *PACE\_checkout\_1.tcl*

```
# PACE 5000
# Tarkastustesti 2 hPa–14 hPa edestakaisin, mittaus 2 min
# Odotusajat paineenmuutosten välillä 10 min. akateeminen arvaus

# Oletuksena ollaan alle 2 hPa paineessa,
# manuaaliventtiili kiinni ja turbopumppu
# pois päältä. PACE tilassa "Measure".

# Sarjaportin konfiguraatio
set serial [open "/dev/ttyUSB4" RDWR]
configure $serial -mode "9600,n,8,1"
configure $serial -blocking 0 -buffering none

# Painepisteet
set p(1) 2
set p(2) 4
set p(3) 6
set p(4) 8
set p(5) 10
set p(6) 12
set p(7) 14

set size [array size p]

#####
# Ylöspäin

set n 1

while {$n <= $size} {
    puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES $p($n)\r"
    puts "Pressure poin $p($n) hPa set"
    puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
    puts "Control started"

    # Odotetaan 10 min
    after 600000

    # Kysytään onko stabiili
    puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"
    after 1000
```

```

set limits "[read $serial]"
puts "Status: $limits"

# Asetetaan mittaus tila
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
puts "Measuring for 2 min"
after 120000

set systemTime [clock seconds]
puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"
set n [expr {$n + 1}]
}
#####
# Alaspäin
set n 6

while {$n > 0} {
  puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES $p($n)\r"
  puts "Pressure point $p($n) hPa set"
  puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
  puts "Control started"

  # Odotetaan 10 min
  after 600000

  # Kysytään onko stabiili
  puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"
  after 1000
  set limits "[read $serial]"
  puts "Status: $limits"

  # Asetetaan mittaus tila
  puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
  puts "Measuring for 2 min"
  after 120000

  set systemTime [clock seconds]
  puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"
  set n [expr {$n - 1}]
}

puts "Script finished, going back to vacuum"
puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES 0.0\r"

```

```
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"  
after 900000  
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"  
puts -nonewline $serial ":LOC\r"  
close $serial
```

### B.2.2 *PACE\_checkout\_2.tcl*

```
# Tarkastustesti 2 hPa-14 hPa edestakaisin, mittaus 1 min

# Oletuksena ollaan alle 2 hPa paineessa,
# manuaaliventtiili kiinni ja turbopumppu
# pois päältä. PACE:ssa tila "Measure".

# Sarjaportin konfiguraatio
set serial [open "/dev/ttyUSB4" RDWR]
fconfigure $serial -mode "9600,n,8,1"
fconfigure $serial -blocking 0 -buffering none

# Paine pisteet
set p(1) 2
set p(2) 4
set p(3) 6
set p(4) 8
set p(5) 10
set p(6) 12
set p(7) 14

set size [array size p]

#####
# Ylöspäin

set n 1

while {$n <= $size} {
  puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES $p($n)\r"
  puts "Pressure poin $p($n) hPa set"
  puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
  puts "Control started"

  # Odotetaan 5 min.
  after 300000

  # In limits?
  puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"

  after 1000
  set stable "[read $serial]"
  set stabbit [string range $stable 25 26]
```

```

while { $stabbbit == 0 } {
  after 60000
  puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"
  after 1000
  set stable "[read $serial]"
  set stabbbit [string range $stable 25 26] }

puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
after 5000
puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
after 1000
set pres "[read $serial]"
set paine [string range $pres 11 20]

# Paineen tarkistus
if { $paine < [expr $p($n) - 0.1] || $paine >
[expr $p($n) + 0.1] } {
  puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
  puts "Control continued"
  after 60000
  puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
  after 1000
  set pres "[read $serial]"
  set paine [string range $pres 11 20] }

set systemTime [clock seconds]
puts "Pressure $p($n) hPa stable, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"

# Mittaus 1 min
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
puts "Measuring for 1 min"
after 60000
puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
after 1000
set pres "[read $serial]"
set paine [string range $pres 11 20]
puts "Pressure: $paine"
set systemTime [clock seconds]
puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S]"
set n [expr {$n + 1}]
}
#####
# Alaspäin

```

```

set n [expr {$size -1}]

while {$n > 0} {
    puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES $p($n)\r"
    puts "Pressure poin $p($n) hPa set"
    puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
    puts "Control started"

    # Odotetaan 5 min.
    after 300000

    # In limits?
    puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"

    after 1000
    set stable "[read $serial]"
    set stabbit [string range $stable 25 26]

    while {$stabbit == 0} {
        after 60000
        puts -nonewline $serial ":SENS:PRES:INL?\r"
        after 1000
        set stable "[read $serial]"
        set stabbit [string range $stable 25 26] }

    puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
    after 5000
    puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
    after 1000
    set pres "[read $serial]"
    set paine [string range $pres 11 20]

    # Paineen tarkistus
    if {$paine < [expr $p($n) - 0.1] || $paine >
        [expr $p($n) + 0.1]} {
        puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
        puts "Control continued"
        after 60000
        puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
        after 1000
        set pres "[read $serial]"
        set paine [string range $pres 11 20] }

    set systemTime [clock seconds]
    puts "Pressure $p($n) hPa stable, time:

```



```

[clock format $systemTime -format %H:%M:%S] "

# Mittaus 1 min
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
puts "Measuring for 1 min"
after 60000
puts -nonewline $serial ":SENS:PRES?\r"
after 1000
set pres "[read $serial]"
set paine [string range $pres 11 20]
puts "Pressure: $paine"
set systemTime [clock seconds]
puts "Measurement complete, time:
[clock format $systemTime -format %H:%M:%S] "
set n [expr {$n - 1}]
}

puts "Script finished, going back to vacuum"
puts -nonewline $serial ":SOUR:PRES 0\r"
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT ON\r"
after 900000
puts -nonewline $serial ":OUTP:STAT OFF\r"
puts -nonewline $serial ":LOC\r"
close $serial

```